

**Département de Géomatique appliquée  
Faculté des Lettres et Sciences Humaines  
Université de Sherbrooke**

**Étude de la dégradation des sols due à la dynamique agricole au Sud du Mali**

**par**

**Cyrielle Loyer**

**Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès. sciences géographiques (M.Sc.),  
cheminement Géomatique**

**Avril 2011**

**© Cyrielle Loyer, 2011**

*I-2499*



Library and Archives  
Canada

Published Heritage  
Branch

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*

*ISBN: 978-0-494-88848-3*

*Our file Notre référence*

*ISBN: 978-0-494-88848-3*

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

## **Composition du jury**

**Étude de la dégradation des sols due à la dynamique agricole au Sud du Mali**

**Ce mémoire a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :**

**Kalifa Goïta, directeur de recherche (Département de Géomatique appliquée, Faculté des Lettres  
et Sciences Humaines, Université de Sherbrooke)**

**Ph. D. Lacina Coulibaly (Faculté de Foresterie, Université de Moncton)**

**Ph. D. Mickaël Germain (Département de Géomatique appliquée, Faculté des Lettres et Sciences  
Humaines, Université de Sherbrooke)**

**Mr. Michel Yergeau (Université de Sherbrooke)**

## **Résumé**

La présente recherche répond au besoin actuel d'évaluer l'impact des activités humaines sur les ressources naturelles de manière à encourager une exploitation durable de ces ressources. On s'intéresse précisément ici à une centaine de parcelles situées autour du terroir d'Umarbugu au Sud du Mali, une région particulièrement sensible au phénomène de dégradation des sols.

L'application du modèle SLEMSA aux données caractérisant les parcelles agricoles mentionnées précédemment a permis d'obtenir des estimations annuelles des taux de pertes en sols. Celles-ci reflètent la grande variabilité et l'intensité du climat avec des années de sécheresse et très peu de pertes en sols mais aussi des années dans la moyenne, 850 mm de précipitations répartis sur environ quatre mois, ou davantage, avec des épisodes de pluies beaucoup plus intenses et de fait des pertes beaucoup plus alarmantes pouvant dépasser les 35 t/ha/année. L'analyse des estimations obtenues a également permis d'identifier certains facteurs aggravant tels que la culture du coton ou les champs ayant une grande superficie. Le modèle choisi permet de tenir compte d'éventuelles pratiques de conservation et l'on sait que certains propriétaires des champs d'Umarbugu commencent à utiliser la culture en courbes de niveau, ce qui réduit l'écoulement et favorise la rétention de l'eau. On a donc effectué quelques simulations afin d'évaluer l'impact de telles pratiques et l'on a abouti à une diminution d'environ 60 % des taux de pertes de sols.

**Mots-clés :** dégradation des sols, modélisation, SLEMSA, Afrique subsaharienne, agriculture.

## Table des matières

Table des matières .....	i
Liste des tableaux .....	iii
Liste des figures .....	iv
Liste des annexes .....	v
Remerciements .....	vi
1. Introduction .....	1
1.1. Notion de dégradation des terres et état du phénomène à travers le monde .....	1
1.2. Problématique .....	1
1.3. Objectifs .....	2
1.4. Hypothèse scientifique .....	2
1.5. Site d'étude .....	3
2. Revue de littérature .....	5
2.1. Processus d'érosion et facteurs d'influence .....	5
2.2. État d'avancement des recherches en matière d'érosion .....	8
2.3. Synthèse des différents types de modèles d'érosion hydrique existants .....	9
2.3.1. Modèles unidimensionnels empiriques basés sur l'USLE .....	9
2.3.2. Modèles unidimensionnels semi-empiriques .....	11
2.3.3. Modèles « orientés processus » .....	13
2.3.4. Modèles distribués continus .....	15
2.4. Pistes pour orienter le choix d'un modèle .....	17
2.4.1. Objectifs de l'étude .....	17
2.4.2. Spécificités de la zone d'étude .....	18
2.4.3. Données disponibles .....	19
2.4.4. Échelle spatiale .....	19
2.4.5. Échelle temporelle .....	20
2.4.6. Choix du modèle .....	20
3. Méthodologie .....	22
3.1. Application du modèle SLEMSA .....	24
3.1.1. Présentation des données .....	24

3.1.2.	Le sous-modèle K.....	26
3.1.3.	Le sous-modèle C.....	28
3.1.4.	Le sous-modèle X.....	29
3.2.	Simulations .....	29
3.2.1.	Simulation temporelle des données relatives aux cultures.....	30
3.2.2.	Simulation de mesures de conservation des sols.....	30
4.	Résultats, analyse et validation .....	31
4.1.	Estimations obtenues par l'application du modèle SLEMSA .....	31
4.1.1.	Le sous-modèle K .....	31
4.1.2.	Le sous-modèle C .....	32
4.1.3.	Le sous-modèle X .....	34
4.2.	Estimations obtenues par l'application du modèle SLEMSA aux données réelles .....	36
4.3.	Estimations obtenues par l'application du modèle aux données simulées .....	41
4.3.1.	Simulation temporelle des données relatives aux cultures.....	41
4.3.1.	Simulation de mesures de conservation des sols.....	44
4.4.	Discussion.....	49
5.	Conclusion .....	51
6.	Références.....	52
7.	Annexes.....	56

## Liste des tableaux

Tableau 1. Description des données .....	25
Tableau 2. Méthode de calcul de l'indice d'érodabilité du sol ( $F$ ) .....	27
Tableau 3. Couvert végétal moyen selon les types de cultures.....	29
Tableau 4. Validation par comparaison des résultats obtenus pour le sous-modèle K .....	31
Tableau 5. Exemple de résultats obtenus par le calcul du sous-modèle K.....	32
Tableau 6. Résultats du sous-modèle C .....	33
Tableau 7. Validation par comparaison des valeurs obtenues pour le sous-modèle X .....	34
Tableau 8. Valeurs de $s$ et de $L$ pour les 10 parcelles choisies. ....	44
Tableau 9. Pourcentage de diminution des pertes de sols entre les estimations obtenues sans pratiques de conservation et les estimations issues de la simulation de telles pratiques. ....	45

## Liste des figures

Figure 1. Carte de localisation de la zone d'étude .....	4
Figure 2. Schéma de l'érosion hydrique de surface .....	6
Figure 3. Schéma du transport des particules par le vent .....	7
Figure 4. Organigramme méthodologique .....	23
Figure 5. Carte d'inclinaison des pentes à l'intérieur des limites des parcelles .....	35
Figure 6. Répartition des cultures par année .....	37
Figure 7. Carte des taux de pertes de sol pour 2002 .....	38
Figure 8. Carte des taux de pertes de sols pour 2003 .....	39
Figure 9. Évaluation temporelle des pertes en sols .....	43
Figure 10. Histogramme de comparaison des taux de pertes en sols (Z) pour l'année 2000 .....	46
Figure 11. Histogramme de comparaison des taux de pertes en sols (Z) pour l'année 2001 .....	47
Figure 12. Histogramme de comparaison des taux de pertes en sols (Z) pour l'année 2002 .....	48



## **Liste des annexes**

Annexe 1. Cartes des estimations de pertes de sols .....	56
Annexe 2. Graphiques de comparaison des estimations de pertes de sols .....	61

## **Remerciements**

Je tiens à remercier l'Université de Sherbrooke et plus particulièrement le Département de Géomatique Appliquée pour m'avoir permis d'effectuer cette maîtrise et pour m'avoir octroyé une bourse institutionnelle ayant contribué au financement de mes études.

Je remercie le Dr Kalifa Goïta d'avoir accepté la charge de diriger ma maîtrise et de m'avoir mise en contact avec Sibiry Traoré, envers qui je suis également reconnaissante d'avoir partagé avec moi ses connaissances du terrain mais aussi d'avoir mis à ma disposition toutes les données nécessaires à la réalisation de mon projet.

Je souhaite également remercier particulièrement Michael Roberge, François Charland, Francis Caron et Gabriel Constantin pour leur aide précieuse dans des moments difficiles. De même, je remercie tous mes amis et collègues pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ces trois années d'études. Enfin mais surtout, je souhaite exprimer mon immense gratitude à mes parents pour leur soutien moral mais aussi financier, sans lequel cette maîtrise n'aurait pas été possible.

Je remercie également les membres du jury Lacina Coulibaly, Mickaël Germain et Michel Yergeau pour avoir accepté de lire et d'évaluer mon mémoire.

Je dédie ce mémoire à Élise Le Coustumer (1918 – 2010) et à Madeleine Machard (1918 – 2011) à qui je dois le courage, la persévérance et la détermination qui m'ont permis de mener à bien ce projet.

# **1. Introduction**

## **1.1. Notion de dégradation des terres et état du phénomène à travers le monde**

L'érosion des sols constitue un problème environnemental majeur qui touche particulièrement les régions arides et semi-arides, mais aussi, et de plus en plus, les grandes régions agricoles à travers le monde. Le phénomène d'érosion des sols a pour conséquence ultime la désertification, elle-même définie par la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CCD) comme étant « un état de dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines ».

Indirectement, l'érosion des sols constitue également un danger pour l'humanité dans la mesure où elle menace les productions agricoles qui sont parfois le principal, sinon le seul, moyen de subsistance des populations. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 2005), la dégradation des terres atteint directement 250 millions de personnes sur la planète et en menace près d'un milliard.

L'Afrique, dont les terres désertiques ou arides constituent les deux tiers de la superficie totale, est le continent le plus touché par ce phénomène. On y trouve de vastes étendues de terres agricoles arides, notamment au Sahel, dont les deux tiers sont déjà fortement atteintes par le phénomène de désertification (OMM, 2005).

Depuis la fin des années 1960, le Sahel est considéré comme l'une des régions les plus affectées par le phénomène de désertification du fait de son déficit pluviométrique record (Hountondji *et al.*, 2004). Plusieurs périodes de grande sécheresse au cours des cinq dernières décennies ont affecté le Sahel, et plus particulièrement le Niger et le Mali, et ont engendré d'importantes famines. De telles catastrophes mettent en valeur la nécessité d'assurer la durabilité et de fait la productivité des ressources.

## **1.2. Problématique**

Le Mali est un pays essentiellement constitué d'un milieu aride, le Sahara recouvrant plus d'un tiers du territoire au Nord, et de milieux semi-arides, les écosystèmes de savane du Sahel présents au centre et au Sud du pays. Par ailleurs, le Mali étant un pays en voie de développement, il a

connu au cours des dernières décennies une croissance démographique relativement forte (2,63 %, Gouvernement du Mali, 2000). Une telle augmentation de population s'accompagne habituellement d'une intensification de l'agriculture et de l'élevage sans pour autant impliquer nécessairement une évolution des pratiques agricoles et leur adaptation aux changements environnementaux. Cela entraîne une dégradation rapide des sols et favorise donc le processus de désertification. Or, comme on l'a évoqué précédemment, les sols, support de l'agriculture, constituent le principal moyen de subsistance de nombreuses personnes dans les régions rurales du Mali (Gouvernement du Mali, 2000). Il s'agit donc d'une ressource extrêmement précieuse et il est indispensable de la préserver et de s'assurer dès maintenant de la durabilité de son utilisation. Pour cela, il est intéressant d'étudier d'une part l'évolution du paysage sur un grand nombre d'années, et d'autre part les conséquences des activités humaines sur les ressources en sols.

### **1.3. Objectifs**

L'objectif principal de la présente étude est d'évaluer l'évolution de la dégradation des terres due aux pratiques agricoles dans la partie Sud du Mali.

Plus spécifiquement, la présente étude visera à :

- appliquer un modèle d'érosion qui permettra de révéler l'évolution sur plusieurs décennies de la quantité annuelle de pertes des sols. Les résultats seront alors comparés à ceux issus d'études similaires afin d'en vérifier la valeur et d'estimer le potentiel d'efficacité du modèle dans le contexte de cette recherche;
- effectuer des simulations à l'aide du modèle en considérant l'âge des parcelles et l'usage de mesures de conservation;
- évaluer l'impact à long terme des cultures sur les pertes de sols et l'influence de l'emploi de mesures de conservation sur cet impact.

### **1.4. Hypothèse scientifique**

De manière générale, on s'attend à ce que l'application d'un modèle d'érosion permette de révéler l'impact de la dynamique agricole sur la dégradation des sols au Sud du Mali.

Le potentiel largement démontré du modèle SLEMSA (Elwell, 1978; Igwe *et al.*, 1997; Morgan *et al.*, 1997; Svorin, 2003 et Bobe, 2004) pour évaluer les pertes de sols dues à l'agriculture dans les régions semi-arides de l'Afrique australe et orientale permet de croire qu'il donnera des résultats consistants sur une base temporelle au Sud du Mali.

### **1.5. Site d'étude**

Le terroir d'Umarbugu fait partie du Cercle de Koutiala qui se situe au Nord-Est de la région de Sikasso au Sud du Mali. La région d'étude (environ 60 × 60 km) est centrée sur ce hameau dont les coordonnées géographiques sont 12° 11' 42'' Nord et 5° 8' 22'' Ouest. La figure 1 illustre les parcelles situées autour du hameau d'Umarbugu utilisées pour la calibration du modèle.

L'agriculture tient une part très importante dans l'économie du Mali puisqu'elle représente 47% du PIB. Par ailleurs, malgré l'intensification de l'exode rural au cours des dernières années, 75% de la population vit à l'extérieur des principales villes. Le pays connaît une forte croissance démographique, mais la densité de population y est inégalement répartie. En effet, elle est moins élevée au Nord qu'au Sud du pays, où le climat est propice à l'agriculture (Gouvernement du Mali, 2000).

Le climat de la zone d'étude correspond au climat tropical soudanien, avec des précipitations plus abondantes que la moyenne du pays, soit en moyenne 850 millimètres par an. On y cultive essentiellement le mil, le sorgho, le maïs et le coton, dont la production de la région équivaut à près des deux tiers de celle du pays. Cependant, même si Sikasso est l'une des régions agricoles les plus importantes du Mali, la diminution des précipitations et la dégradation des sols au cours des dernières décennies ont entraîné une importante réduction de la période de culture (Gouvernement du Mali, 2000).

L'importance du secteur agricole au Sud du Mali, notamment du point de vue économique, associée à la croissance démographique présentent le risque d'accroître fortement le phénomène d'appauvrissement des sols. Il est donc indispensable de prendre des mesures pour limiter les conséquences à long terme de la dégradation des terres.

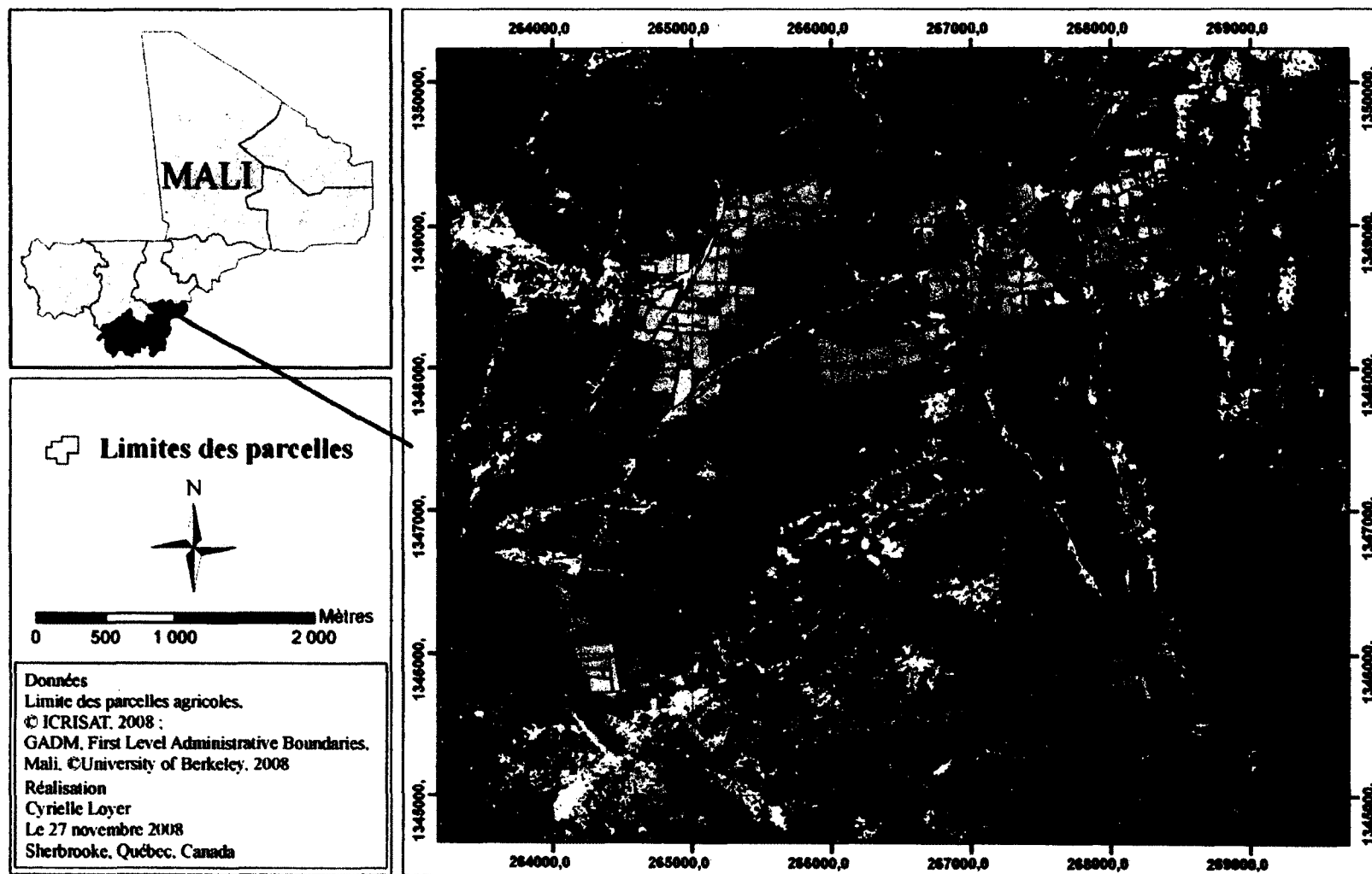


Figure 1. Carte de localisation de la zone d'étude

## **2. Revue de littérature**

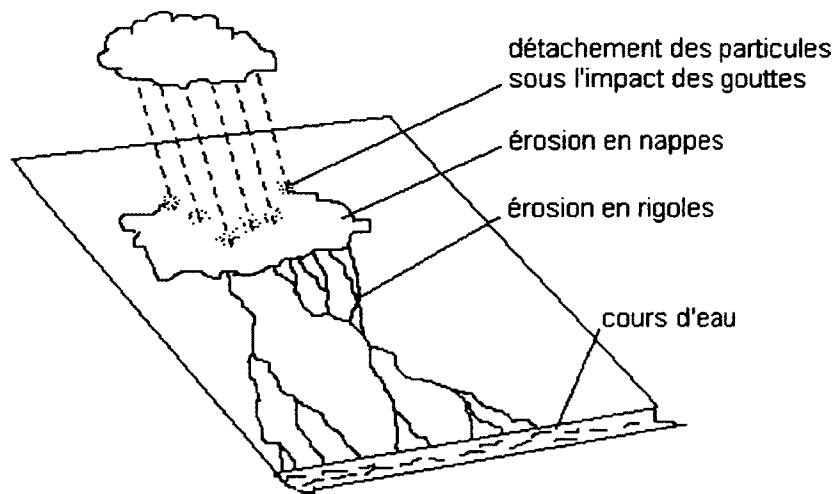
Dans un premier temps, nous tenterons de décrire succinctement mais néanmoins de manière précise le processus d'érosion et les facteurs pouvant l'influencer. Par la suite, nous parcourrons l'évolution des recherches scientifiques concernant ce phénomène afin d'aboutir au choix de la méthode à employer dans le cas de la présente étude.

### **2.1. Processus d'érosion et facteurs d'influence**

L'érosion se définit par l'ensemble des phénomènes qui modifient le relief en enlevant des matériaux, ou parties de matériaux, situés à la surface du sol ou à faible profondeur (Foucault et Raoult, 2000). Il existe en fait deux types de processus d'érosion : les processus chimiques et les processus physiques ou mécaniques. La plupart du temps ces deux types de processus s'additionnent, cependant, l'érosion due aux processus physiques ou mécaniques est dix fois plus importante que l'érosion due aux processus chimiques, qui n'enlèvent en moyenne que 6 à 7 mm de matière au sol à chaque millier d'années. On s'intéressera ici plus particulièrement aux processus physiques et mécaniques. Ceux-ci sont définis par Foucault et Raoult (2000) comme étant la « désagrégation des roches et l'enlèvement des débris par un fluide, d'où la distinction entre érosions éolienne, fluviatile, glaciaire, marine ».

Dans cette partie de l'étude, on considérera d'une part les mécanismes d'érosion hydrique de surface, et d'autre part ceux de l'érosion éolienne. L'érosion hydrique de surface peut-être schématisée comme à la figure 2. Celle-ci montre tout d'abord l'influence des précipitations sur le processus d'érosion, mais également la contribution du réseau hydrographique lui-même.

C'est en effet principalement sous l'effet de la pluie que se produit le détachement des particules. L'impact des gouttes sur le sol sec provoque la désagrégation des matériaux et leur éjection aux alentours du point d'impact. Si les pluies sont suffisamment intenses, il se peut que l'infiltration de l'eau dans le sol et le ruissellement en rigoles ne se fassent pas assez rapidement, alors on observera aussi de l'érosion en nappes. Ce phénomène est également observable lorsque la pente est nulle, que la surface du sol est recouverte d'une cuirasse imperméable ou lorsque le sol est déjà saturé d'humidité.



**Figure 2. Schéma de l'érosion hydrique de surface**

Le ruissellement en rigoles correspond aux chemins empruntés par l'eau descendant la pente, semblable à de minuscules ruisseaux. Il transporte une partie des sédiments issus du détachement par l'impact des gouttes et de l'érosion en nappe. À cela s'ajoutent les particules arrachées aux parois des rigoles sous l'effet de la force du flot. Les réseaux de rigoles acheminent les sédiments qu'ils transportent jusqu'à un cours d'eau ou directement jusqu'à un plan d'eau.

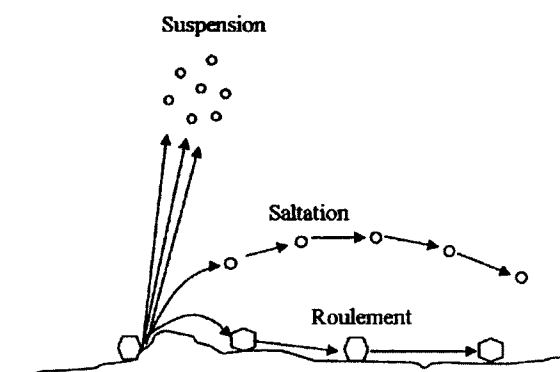
S'ajoutent aux processus hydriques de surfaces les processus souterrains. Ils opèrent de deux manières, la première consiste en l'écoulement hypodermique, où l'eau ruisselle sous la surface mais sur une strate imperméable du sol. Dans ce cas, soit l'eau atteint une zone de résurgence et rejoint un cours d'eau, soit elle finit par quitter la strate imperméable et s'infiltrer dans le sol. Le second processus souterrain est justement associé à l'infiltration de l'eau dans le sol puisque celle-ci transporte elle aussi des sédiments qu'elle achemine parfois jusqu'à des nappes souterraines.

L'érosion éolienne est un processus relativement simple à expliquer, mais pourtant complexe à modéliser. Comme l'indique la figure 3, le vent détache les particules à la surface du sol et les transporte de trois manières : la suspension, la saltation et le roulement. La suspension transporte les particules plus fines dans les courants éoliens, parfois sur de très longues distances. Le roulement caractérise le transport des particules les plus grossières à la surface du sol. La



saltation s'applique quant à elle aux particules moyennes qui sont trop lourdes pour être uniquement transportées par le vent et sont donc soumises à des rebonds à la surface du sol.

La complexité de ce processus réside d'une part dans la composition et la taille des grains à la surface du sol et d'autre part dans les obstacles que les particules peuvent rencontrer. L'influence de ces facteurs est difficile à prévoir car elle dépend de paramètres eux-mêmes compliqués à mesurer avec précision tels que la direction et la force du vent.



**Figure 3. Schéma du transport des particules par le vent**

Le processus d'érosion, qu'il soit hydrique ou éolien, est influencé par différents facteurs que l'on peut regrouper en trois catégories : énergie, résistance et protection (Morgan, 2005). L'énergie regroupe les précipitations, le ruissellement et le vent qui, conjointement considérés, constituent ce que l'on nomme l'érosivité. La résistance correspond à l'érodabilité du sol qui dépend directement de ses propriétés physiques et chimiques. Celles-ci peuvent par exemple favoriser l'infiltration de l'eau et de fait réduire le ruissellement. La protection se traduit par le couvert végétal qui réduit également le ruissellement et constitue une barrière à l'érosion éolienne.

L'érosivité dépend plus précisément de paramètres climatiques tels que la fréquence et l'intensité des pluies ou encore la direction et la vitesse du vent. L'érodabilité, quant à elle, est liée à la nature du sol, c'est-à-dire principalement sa composition et sa perméabilité, ainsi qu'à la topographie, soit plus précisément l'inclinaison et la longueur des pentes. Enfin la protection est déterminée par la couverture végétale mais aussi, lorsqu'il s'agit d'un milieu agricole, par certaines pratiques culturales. Ces dernières peuvent également avoir une influence sur l'érodabilité du sol.

## **2.2. État d'avancement des recherches en matière d'érosion**

De nombreuses études effectuées par le passé ont permis de développer différentes méthodes pour l'évaluation et le suivi de la dégradation des terres dans les régions arides et semi-arides. Une partie de ces études s'appuie sur l'évolution de la végétation, en appliquant par exemple l'indice de végétation normalisée (NDVI), le plus souvent associé aux données relatives à la pluviométrie (Hountondji *et al.*, 2004, Symeonakis et Drake, 2004). D'autres études s'intéressent davantage aux changements de composition du sol dans le but de mettre au point des indices indépendants des éventuels épisodes de hausse brutale des précipitations (Xiao *et al.*, 2006). L'idéal cependant est de mettre en relation ces deux types d'indices et de modéliser l'érosion des sols, tel que l'ont effectué Symeonakis et Drake (2004) à l'échelle de l'Afrique subsaharienne. Malheureusement, les recherches entreprises s'appliquent le plus souvent à de petites échelles. En effet, si l'on souhaite étudier le phénomène de dégradation des terres à l'échelle locale en Afrique subsaharienne, on se retrouve confronté au manque de précision des données disponibles. Cela concerne tant la dimension spatiale des données que leur dimension temporelle.

Depuis de nombreuses années, les scientifiques se sont intéressés à la modélisation du processus de dégradation des sols et les méthodes d'investigation se sont améliorées dans le but de faciliter la compréhension et la représentation du phénomène et de son évolution spatio-temporelle. Cependant, la modélisation de l'érosion éolienne, bien qu'ayant fait l'objet de nombreuses études, a connu une évolution beaucoup moins rapide que la modélisation de l'érosion hydrique. La principale cause de cette lente évolution réside dans la difficulté à simuler le détachement et le transport des particules par le vent sur des sols dont la surface et le couvert végétal sont variables. En effet, il n'est pas tant complexe de modéliser ces processus lorsqu'il s'agit de milieux simples et homogènes tels que les dunes de sable, mais lorsqu'il s'agit d'étudier des milieux caractérisés par une rugosité de surface et une composition du sol hétérogènes, la tâche devient très délicate. S'ajoute à cela la végétation qui constitue un obstacle au transport des particules, et ce relativement à leurs caractéristiques, à celle des végétaux ainsi qu'à la force et à la direction du vent. Pour ces raisons, mais également au regard des contraintes (détaillées à la section 2.4.6) régissant la présente recherche, on s'intéressera ici exclusivement au processus d'érosion hydrique.

### **2.3. Synthèse des différents types de modèles d'érosion hydrique existants**

La modélisation numérique de l'érosion hydrique a fait l'objet de multiples recherches depuis les années 1970 et il existe à ce jour un très grand nombre de modèles s'adaptant à la variabilité des facteurs qui conditionnent cette forme d'érosion. Au fur et à mesure que la compréhension de l'implication de ces facteurs évolue, les modèles s'améliorent et se complexifient.

Les modèles les plus récents ont l'avantage de produire des prédictions de plus en plus justes, mais nécessitent pour cela d'être alimentés en données très précises. Cela implique donc souvent de lourdes campagnes de terrain, ce qui rappelle les inconvénients des techniques plus anciennes d'évaluation de l'érosion. Ces campagnes sont d'autant plus nécessaires dans les régions du monde pour lesquelles peu de données sont disponibles, tant pour le climat, la topographie, les pratiques agricoles ou la végétation. L'apport de la télédétection peut permettre de pallier à certains de ces inconvénients, mais encore là, les données ne sont pas toujours disponibles ou en quantité suffisante et cela accroît la complexité des modèles.

Les modèles plus anciens, tels que l'USLE (Wischmeier et Smith, 1978) et ses dérivés, possèdent quant à eux l'inconvénient de s'appliquer à des échelles spatiale et temporelle limitées. Par ailleurs, ils ne tiennent pas compte de toute la complexité des facteurs qui influencent l'érosion, ce qui peut engendrer une vaste marge d'erreur. Celle-ci s'accroît davantage si l'on utilise un modèle qui n'est pas adapté à la zone d'étude. Cependant, il s'agit de modèles qui ont fait l'objet de nombreuses recherches et autant d'améliorations. Ils ont été largement appliqués, dans de multiples régions du monde aux conditions climatiques, topographiques différentes et sujettes à des pratiques culturelles variées. La précision de leurs simulations, bien que relative, n'en fait pas moins des modèles efficaces. On dénombre également quantité d'études portant sur les sources d'erreurs de ces modèles, il est donc possible de prévoir, sinon de corriger ces erreurs. Par ailleurs, ils ont l'avantage d'être simples d'utilisation et de nécessiter des données d'une moins grande précision. Les modèles basés sur l'USLE constituent donc une option à privilégier lorsque la zone d'étude ne permet pas d'avoir accès à beaucoup de données.

#### **2.3.1. Modèles unidimensionnels empiriques basés sur l'USLE**

Les modèles empiriques s'appuient, par définition, sur des expérimentations menées sur le terrain. Cela implique donc une dépendance étroite avec les conditions physiques et climatiques

dans lesquelles ils ont été conçus. Par exemple, si l'on considère le cas de l'USLE, elle a été élaborée dans l'Est des montagnes rocheuses aux États-Unis, pour des pentes relativement faibles et sur un certain type de sols (Morgan, 2005). Il en résulte sa délicate adaptation à des conditions trop différentes de celles évoquées précédemment.

Par ailleurs, les modèles empiriques basés sur l'USLE s'appliquent uniquement à l'échelle d'une parcelle, puisqu'ils ne tiennent pas compte de la variabilité spatiale des facteurs qui les régissent, et ne permettent d'obtenir qu'une approximation de la moyenne annuelle de pertes de sols. Ce type de modèles ne saurait être utilisé dans les études ayant pour objectif d'identifier précisément les zones sensibles à l'érosion à de petites échelles, par exemple à l'échelle d'un bassin versant ou encore à l'échelle régionale.

En revanche, si l'on souhaite obtenir une appréciation quantitative de la perte des sols sur une petite zone d'étude, ou si cette zone est située dans une région relativement homogène du point de vue des facteurs pris en compte, les modèles tels que l'USLE sont appropriés. Ils présentent même l'avantage non négligeable d'être peu coûteux dans la mesure où ils sont relativement simples à utiliser et nécessitent peu de données comparativement aux modèles plus récents et plus complexes.

En mettant en relation le processus d'érosion avec la longueur et l'intensité des pentes, Zingg (1940) effectuait le premier pas vers le développement d'une équation de perte des sols. Les recherches sur ce sujet effectuées par la suite ont amené à compléter l'équation initiale en y ajoutant les facteurs climatique, agricole, de conservation et d'érodabilité du sol. Le facteur agricole correspond au type de culture et le facteur de conservation aux aménagements visant à réduire l'érosion. Ce qui différencie ces développements de l'équation universelle de perte des sols (USLE) connue à ce jour est le facteur climatique. En effet, dans l'USLE de Wischmeier et Smith (1978), le facteur climatique précédemment utilisé a été remplacé par un indice d'érosivité des précipitations (Morgan, 2005). L'équation universelle de perte des sols s'écrit à présent comme suit :

$$E = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

Où  $E$  est la moyenne annuelle de perte des sols,  $R$  est le facteur d'érosivité des précipitations,  $K$  est le facteur d'érodabilité du sol,  $L$  est le facteur de longueur de pente,  $S$  est le facteur du degré

d'inclinaison de la pente,  $C$  est le facteur du type de culture pratiqué et  $P$  est le facteur de contrôle de l'érosion.

Depuis sa mise au point, l'USLE a connu quelques améliorations. Ces modifications ont abouti dans un premier temps à une version modifiée de l'équation universelle de perte des sols (MUSLE) dont l'une des principales caractéristiques est de la rendre applicable à des événements pluviométriques individuels. Cette équation améliore, comparativement à l'USLE, les prédictions en ce qui concerne la production de sédiments (Williams *et al.*, 1978). Par la suite les facteurs d'érodabilité du sol, du relief et des pratiques culturales ont été modifiés pour aboutir à l'équation universelle révisée de perte des sols, RUSLE (Renard *et al.*, 1997).

À la suite d'études menées au Zimbabwe, certains scientifiques se sont aperçus du manque d'efficacité de l'USLE dans ce type de régions (Elwell, 1978, cité par Breetzke, 2004). Un modèle d'estimation de l'érosion des sols pour les régions du Sud du continent Africain (SLEMSA) a alors été mis au point.

### **2.3.2. Modèles unidimensionnels semi-empiriques**

À l'inverse des modèles empiriques basés sur l'USLE, ce type de modèle permet de modéliser séparément les processus physiques impliqués dans le mécanisme d'érosion. Ils permettent donc d'éviter la négligence de certaines interactions entre ces processus, telle qu'elle a été évoquée à la section précédente. À titre d'exemple, le ruissellement en rigoles et le détachement des particules à l'extérieur des rigoles sont simulés par deux équations distinctes (Wu *et al.*, 1993). D'autre part, bien qu'ils conservent des composantes empiriques, ces modèles s'appuient davantage sur des lois physiques. Ce type de modèles a principalement été développé dans le but de mieux comprendre le phénomène de pollution diffuse dans les milieux agricoles (Gaillard, 2001), mais il a également permis de répondre à des objectifs plus généraux, liés à la recherche dans le domaine de la modélisation hydrologique. Parmi ceux-ci, on peut citer la simplification du processus de modélisation puisque les modèles unidimensionnels semi-empiriques ne requièrent pas de calibration systématique pour chacune des composantes du modèle.

L'un de ces modèles, dénommé CropSyst (Cropping Systems Simulation Model), permet de simuler ces processus de manière journalière mais avec l'avantage de pouvoir intégrer des données sur plusieurs années, en considérant les changements de culture. Ce modèle présente

également l'intérêt de s'appuyer sur des concepts simples et d'être d'utilisation facile. CropSyst intègre dans sa simulation les processus suivants :

- le bilan hydrique du sol;
- la consommation en azote des plants;
- la canopée du champ;
- la croissance des racines;
- la production de matière sèche;
- le rendement de la culture;
- la production et la décomposition des résidus;
- l'érosion.

Le modèle CropSyst a par la suite été amélioré de manière notamment à étendre ses possibilités d'application. En effet, de par sa nature semi-empirique, il ne pouvait être utilisé tel quel que dans des régions similaires à celle pour laquelle il a été créé, soit le Nord de la côte Ouest des États-Unis. À la suite de nombreuses études l'ayant mis à l'épreuve, il a pu être modifié de sorte qu'il s'adapte à toute sorte de cultures dans des régions diverses aux conditions climatiques et physiques variables. Cette nouvelle version inclut conséquemment la modélisation de nouveaux processus mais aussi des améliorations purement techniques au niveau de l'interface et du fonctionnement du modèle (Stöckle *et al.*, 2003).

Néanmoins, bien qu'il se défasse en grande partie des défauts imputés à ses composantes empiriques, ce modèle est surtout conçu pour être un outil de gestion agricole. Certes, on peut considérer qu'il favorise la durabilité des exploitations et le respect de l'environnement, mais la modélisation du processus d'érosion n'en constitue pas une composante primordiale. On peut donc supposer que les résultats obtenus par l'application du modèle CropSyst concernant l'érosion des sols ne soient pas d'une très grande précision.

L'intérêt pour une meilleure compréhension des processus inhérents à l'agriculture et une meilleure gestion des cultures a également donné lieu à la mise au point du modèle EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*). Ce modèle ressemble beaucoup au précédent du fait de leurs objectifs communs. Cependant il présente quelques avantages supplémentaires. EPIC a pour objectif principal de modéliser les coûts induits par l'érosion sur la production agricole et les bénéfices que la recherche et le développement de méthodes de gestion du phénomène (Williams

*et al.*, 1983). Tout comme le modèle CropSyst, il est applicable sur de très longues périodes (plusieurs centaines d'années) et peut opérer sur plusieurs zones d'études simultanément.

La considération du processus d'érosion en tant que facteur d'influence sur l'économie agricole est l'un des meilleurs avantages du modèle EPIC. À travers cet aspect, les suites de son application sont une incitation à une meilleure gestion des milieux agricoles. On remarquera par ailleurs qu'à l'inverse du modèle CropSyst, le modèle EPIC tient compte du phénomène d'érosion des sols comme composante principale, on peut donc imaginer que les résultats qu'il permet d'obtenir pour cet élément puissent être plus justes que ceux issus de l'application de CropSyst.

Bien qu'ils présentent de nettes améliorations comparativement aux modèles basés sur l'USLE, les paramètres empiriques que conservent ces modèles doivent parfois être modifiés pour s'adapter à des milieux trop différents de ceux dans lesquels ils ont été conçus (Wu *et al.*, 1993). D'autre part, de même que pour les modèles empiriques, leur application se limitent à une zone d'étude homogène du point de vue du type de sol, des pratiques agricoles, des précipitations et du type de culture.

### **2.3.3. Modèles « orientés processus »**

Les modèles orientés processus opèrent à l'échelle de l'événement pluviométrique. Ils présentent donc l'avantage de simuler le détachement et le transport des sédiments en relation directe avec le volume et l'intensité des pluies. Il est donc logique de supposer que ce type de modèle permette d'obtenir des résultats plus précis concernant le processus d'érosion. Par ailleurs, de même que pour les modèles unidimensionnels semi-empiriques, les modèles orientés processus simulent une multitude de variables liées au phénomène d'érosion des sols.

Outre l'amélioration du point de vue de l'échelle temporelle d'application qui caractérise ces modèles, ils font également l'objet d'une importante évolution au niveau de l'échelle spatiale de la modélisation. En effet, ces modèles sont en mesure de considérer la variabilité du paysage et peuvent donc opérer sur des surfaces bien plus vastes qu'une parcelle agricole. Cette extension de l'aire d'application est permise par la division de la zone étudiée en cellules au sein desquelles les paramètres pris en compte présentent respectivement des caractéristiques homogènes.

Le modèle WEPP (Water Erosion Prediction Project), développé par les scientifiques du Département d'Agriculture des États-Unis (USDA), est parmi les modèles orientés processus les plus connus à ce jour. Ce modèle, qui possède une interface graphique, présente l'avantage de pouvoir simuler l'érosion avec beaucoup de flexibilité à la fois au niveau temporel et au niveau spatial. Du point de vue spatial, le WEPP peut être appliqué soit à l'échelle d'un versant unique, soit à l'échelle d'un petit bassin versant (Flanagan *et al.*, 1995).

À l'échelle temporelle, la flexibilité du modèle WEPP tient au fait qu'il peut être appliqué soit à un unique événement pluviométrique soit de manière continue. En effet la composante climatique du modèle permet un enregistrement de données concernant les occurrences de pluie pour une longue période de temps. Parallèlement, la variabilité temporelle des données relatives au sol, aux types de cultures (tels que les systèmes de rotation) et à leur pratiques culturales respective est prise en compte dans le fonctionnement du modèle.

Ce modèle intègre des données précises, qu'il s'agisse du climat, des caractéristiques du sol, des pratiques agricoles ou de la végétation, et l'on peut donc supposer qu'il permette d'obtenir des résultats assez proches de la réalité. Les calculs de certains paramètres sont similaires à ceux décrits pour le modèle CREAMS (Knisel, 1980) et intègrent eux aussi des composantes empiriques, mais il s'agit d'un modèle très différent, dont les variables sont plus nombreuses et plus détaillées et qui aboutit de fait à des résultats plus précis (Flanagan *et al.*, 1995).

Parmi les modèles orientés processus, le modèle KINEROS2 présente l'avantage particulier d'être conçu pour s'adapter aux régions semi-arides. Il a lui aussi été élaboré au sein du Département d'Agriculture des États-Unis (USDA). Tout comme le modèle précédent, il s'applique à de petits bassins versants en tenant compte de la variabilité de ses paramètres d'entrée tels que la topographie, le climat et la végétation. Après avoir délimité le bassin versant, on découpe celui-ci en zones homogènes du point de vue de l'écoulement de surface à l'aide d'une carte topographique. Ces zones pourront ensuite être subdivisées en fonction des plus petites variations au niveau des caractéristiques du sol, de la végétation, de la pente ou encore de l'utilisation du sol.

Le modèle KINEROS2 présente les mêmes avantages du point de vue de son applicabilité et de sa flexibilité spatio-temporelle dans la mesure où il opère à des échelles spatiales similaires et peut lui aussi être appliqué à un unique événement pluviométrique ou être alimenté



continuellement au fur et à mesure des occurrences de pluie. L'une des améliorations qui le différencie de son prédécesseur (KINEROS) est qu'il permet une redistribution de l'eau infiltrée dans le sol entre deux événements pluviométriques. Puisqu'il a initialement été conçu pour des régions semi-arides, il omet certaines variables incluses dans le WEPP.

Tout comme le modèle WEPP, le modèle KINEROS2 témoigne de la plus grande efficacité des modèles orientés processus pour modéliser le phénomène d'érosion hydrique, puisqu'il intègre avec une grande précision autant les données de précipitations que les données relatives aux caractéristiques du sol. Son application est cependant limitée puisqu'il est conçu pour des régions soumises à un certain type de climat.

On reconnaît cependant les mêmes contraintes aux deux modèles, à savoir la nécessité de disposer de nombreuses données d'une grande précision, notamment en ce qui concerne les précipitations. On précisera par ailleurs que le modèle KINEROS2 requière également des données de microtopographie qui ne sont disponibles que pour de rares régions du Monde et cela constitue une limite d'application non négligeable. Par exemple, si l'on voulait l'appliquer en Afrique, où ces données n'existent pratiquement pas, il faudrait au préalable les créer, soit par une lourde campagne de terrain, soit au moyen de la télédétection. Dans les deux cas cela compliquerait beaucoup l'étude. Il en va de même pour les données de précipitations qui nécessitent un réseau de stations pluviométriques suffisamment dense et d'une grande précision.

#### **2.3.4. Modèles distribués continus**

Les modèles distribués continus simulent le processus d'érosion à l'échelle de grands bassins versants et pour des périodes de temps allant jusqu'à une centaine d'années. De la même manière que les modèles orientés processus présentés à la section précédente, ils tiennent compte de la complexité du paysage que l'on retrouve dans ces bassins versants en les subdivisant en zones homogènes du point de vue des paramètres qu'ils intègrent. Pour faciliter l'identification de ces zones homogènes et le découpage du bassin versant étudié, ces modèles utilisent le plus souvent des données matricielles. Ainsi, grâce à leur interface graphique, ils permettent également de modéliser l'érosion de manière qualitative et quantitative.

Le modèle SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) est sans doute le plus connu des modèles distribués continus. Ce modèle a été conçu principalement dans le but de prédire les effets de la gestion et des changements du paysage sur le transport des sédiments et des polluants par l'eau au

sein de vastes bassins versants. Il opère sur des surfaces de plusieurs milliers de kilomètres carrés et pour des durées allant jusqu'à une centaine d'années. Le fonctionnement du modèle SWAT peut être subdivisé en huit sections contenant elles-mêmes une multitude de paramètres. Les huit sections sont les suivantes (Neitsch *et al.*, 2005):

- le climat : cela comprend l'influence de l'énergie solaire, la température, les précipitations atmosphériques, qu'il s'agisse de pluie ou de neige, et tient également compte de la fonte des neiges;
- l'hydrologie : elle inclut le ruissellement de surface, l'évapotranspiration, l'eau de surface et les eaux souterraines;
- les nutriments et les pesticides : cette section permet de modéliser les cycles de l'azote et du phosphore, les pesticides, les bactéries et l'influence que les autres facteurs pris en compte peuvent avoir sur ces quatre éléments;
- l'érosion : sa modélisation tient compte du transport des sédiments, des nutriments, des pesticides et des bactéries et inclut des équations permettant d'évaluer la qualité de l'eau;
- la couverture végétale et/ou l'agriculture : cela implique les différents types de cultures, leur croissance et les paramètres qui l'influencent et la production;
- les pratiques culturales, les autres méthodes de gestion du paysage et autres types d'utilisation du sol : les deux derniers éléments incluent respectivement la gestion des cours d'eau par la construction de barrages ou encore l'irrigation des cultures, et les aires urbaines ;
- l'évolution des différents processus au sein des principaux cours d'eau : il s'agit du transport des sédiments, des nutriments, des pesticides et des bactéries;
- les plans d'eau : cette section permet de simuler la présence de sédiments, de nutriments, de pesticides et de bactéries dans les différents plans d'eau.

La section concernant l'érosion faisant précisément l'objet de la présente étude, elle mérite une analyse plus approfondie. On remarque tout d'abord qu'elle tient compte non seulement du transport des sédiments mais aussi de celui des nutriments, des pesticides et des bactéries (Neitsch *et al.*, 2005). On peut donc juger que cette forme de modélisation du processus d'érosion est plus juste que pour les autres modèles étudiés dans la mesure où elle considère avec une plus grande exactitude la pollution et l'appauvrissement des sols. Par ailleurs, les équations relatives au transport des sédiments tiennent compte de plusieurs paramètres novateurs tels que les effets

du couvert neigeux, les interruptions du ruissellement de surface et la présence de sédiment dans les eaux souterraines. Cependant, mis à part ces innovations, les facteurs influençant le processus d'érosion que l'on retrouve dans la plupart des modèles, tels que l'érodabilité du sol, l'utilisation de celui-ci, les pratiques culturales ou la topographie, sont empruntés à l'équation modifiée de perte des sols (MUSLE). Le modèle SWAT utilise même l'indice d'érosivité des pluies issue de l'USLE (Wischmeier et Smith, 1978). On constate donc que, malgré sa complexité visant une meilleure représentation des processus physiques et sa constante évolution, le modèle SWAT n'est pas exempt de composantes empiriques.

L'ensemble des modèles distribués continus présente l'avantage de modéliser l'érosion d'un point de vue qualitatif et quantitatif pour de grands bassins versants, et de manière continue sur de longues périodes de temps. Par ailleurs, quelques-uns de ces modèles simulent certains processus plus complexes, tels que les écoulements souterrains, en intégrant des modèles plus spécifiques (Gaillard, 2001). Cependant, bien que l'utilisation de données matricielles simplifie le fonctionnement du modèle, la quantité et la précision des données nécessaires n'en sont pas moins contraignantes. Les limites que l'on peut attribuer à ces modèles ressemblent de fait beaucoup à celles associées aux modèles orientés processus, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent être appliqués dans des régions pour lesquelles il existe trop peu de données. Or, malgré les progrès de la science et du développement international, ces régions sont encore aujourd'hui très nombreuses, en particulier dans les pays du Sud.

## **2.4. Pistes pour orienter le choix d'un modèle**

Lorsque l'on entreprend l'étude du processus d'érosion dans une région particulière et que l'on souhaite pour cela y appliquer un modèle d'érosion, le choix de celui-ci ne doit pas être pris à la légère. Il faut préalablement s'interroger sur plusieurs points concernant autant la recherche elle-même, que la zone d'étude et le modèle à appliquer.

### **2.4.1. Objectifs de l'étude**

Le premier élément auquel il est indispensable de porter attention lors du choix d'un modèle d'érosion est l'objectif de l'étude. En effet, on a pu remarquer que bon nombre des modèles d'érosion existant à ce jour ne simulent pas uniquement le processus d'érosion. Il s'agit donc de savoir si l'étude du phénomène d'érosion constitue l'objectif principal, sinon unique de la

recherche, ou si au contraire, celle-ci s'intéresse par exemple davantage à l'ensemble des processus qu'implique une utilisation agricole du sol. Dans ce dernier cas, la modélisation du processus d'érosion devient alors secondaire. Or lorsqu'il s'agit de l'objectif principal, il est normal de préférer un modèle dont la conception elle-même a été guidée par un intérêt particulier pour l'érosion des sols, car la logique veut que ce type de modèles aboutisse à de meilleurs résultats que ceux au sein desquels la modélisation du processus d'érosion n'est qu'une composante parmi d'autres.

L'influence des objectifs de l'étude sur le choix d'un modèle d'érosion est aussi liée à la zone d'étude elle-même, ainsi qu'aux échelles spatiale et temporelle auxquelles on souhaite appliquer ce modèle. Cependant, dans le but de mettre en valeur la complexité de chacun des éléments à prendre en compte avant de faire un choix judicieux, la zone d'étude, l'échelle spatiale et l'échelle temporelle font l'objet de sections distinctes dans ce chapitre. La prise en compte des objectifs de la recherche est donc considérée comme étant principalement liée à l'importance de la modélisation du processus d'érosion pour l'étude et, de fait, à la précision escomptée.

#### **2.4.2. Spécificités de la zone d'étude**

L'applicabilité des modèles d'érosion dépend étroitement des caractéristiques de la région étudiée. D'une part, le climat est un paramètre qu'il est primordial de considérer pour faire le choix du bon modèle dans la mesure où il joue un rôle essentiel dans le processus d'érosion. Comme cela a été vu à la section 2.3, peu de modèles tiennent compte de l'influence de la neige sur l'érosion des sols, or, dans certaines régions, telles que le Canada ou encore le Nord des États-Unis, cette influence ne saurait être négligée. La plupart des modèles d'érosion sont conçus pour s'appliquer à des régions au climat tempéré, donc soumises à des précipitations relativement abondantes. À l'inverse, les modèles s'adaptant à des climats secs, voir semi-arides, sont encore plus rares que ceux tenant compte du couvert neigeux. Ce type de régions est pourtant généralement le plus sensible à l'érosion des sols. Le choix d'un modèle adéquat sera donc particulièrement difficile si la recherche s'applique à une telle région.

On a également pu remarquer à la section 2.3 que beaucoup de modèles possédaient des bases de données restreintes du point de vue des types de sol, des types de cultures ou encore des pratiques culturales. Cela implique autant de limites au potentiel d'application des modèles concernés. Il

est parfois possible de remédier à ce problème en allant sur le terrain, mais encore faut-il que le modèle soit suffisamment flexible pour intégrer de nouvelles données.

Enfin, la quasi-totalité des modèles d'érosion sont conçus pour opérer sur des milieux agricoles et peu d'entre eux proposent des fonctionnalités permettant de considérer soit les milieux forestiers, soit les milieux urbains. Ce type de contraintes réduit de beaucoup la quantité de modèle possible sans pour autant en simplifier le choix.

Pour faciliter le choix d'un modèle adéquat, il est intéressant de prendre connaissance des régions où le modèle a déjà prouvé son efficacité. Les spécificités de la zone d'étude sont également liées aux données disponibles, ainsi qu'aux échelles spatiale et temporelle d'application. Elles constituent donc l'un des éléments les plus importants à considérer avant de choisir un modèle d'érosion.

#### **2.4.3. Données disponibles**

Il est important de se poser la question des données disponibles car les modèles les plus récents et les plus efficaces nécessitent souvent une grande quantité d'intrants et, pour certains paramètres, des données très précises concernant par exemple les précipitations ou la microtopographie. Il est rare que ce type de données soit disponible avant l'étude, cela implique donc souvent une campagne de terrain.

Les modèles plus anciens ont l'avantage d'être peu exigeants du point de vue des données et, si celles-ci sont déjà disponibles et que les composantes empiriques des modèles peuvent s'adapter à la zone d'étude, ils peuvent être appliqués à celle-ci sans nécessiter de prise de données sur le terrain.

Il arrive parfois qu'une campagne de terrain ne soit pas envisageable. Dans ce cas il est peu probable que l'application d'un modèle récent, donc souvent exigeant du point de vue des données, soit efficace. Lorsqu'il est possible de se rendre sur le terrain, il faut préalablement évaluer la quantité de données à relever et le temps que cela pourrait prendre afin de s'organiser au mieux.

#### **2.4.4. Échelle spatiale**

Les modèles d'érosion sont tous caractérisés par une échelle spatiale qui détermine leur possibilité d'utilisation. Par exemple, si l'on souhaite étudier l'évolution de l'érosion des sols à

une échelle régionale, un modèle du type distribué continu serait le plus approprié. Le choix de l'un de ces modèles doit alors être fait en considérant avec attention chacun des autres éléments cités dans ce chapitre.

En revanche, si l'objectif de l'étude est plutôt d'étudier les effets d'un certain type de culture et des pratiques qu'elle implique, il serait plus efficace d'appliquer un modèle unidimensionnel empirique ou semi-empirique.

Parfois, les spécificités de la zone d'études et les données contraignent le choix du modèle. C'est à dire que, si l'on possède trop peu de données pour la région étudiée, on peut ne pas avoir le choix d'utiliser un modèle empirique tel que l'USLE. Dans de telles régions, il est rare d'appliquer des modèles aux limites spatiales moins restreintes, à moins que l'étude elle-même ne soit pas limitée dans le temps, et que les chercheurs puissent de fait procéder à tous les relevés de données nécessaires.

#### **2.4.5. Échelle temporelle**

L'échelle temporelle constitue elle aussi un paramètre qui conditionne l'application des modèles d'érosion. Une étude portant sur l'influence d'un unique événement pluviométrique sur le processus d'érosion poussera les chercheurs à utiliser un modèle orienté processus. À l'inverse, si l'on souhaite étudier le phénomène sur de longues périodes, par exemple plusieurs décennies, on choisira soit un modèle distribué continu, soit un modèle unidimensionnel empirique ou semi-empirique.

#### **2.4.6. Choix du modèle**

Lorsque l'on entreprend des recherches ayant pour objectif d'évaluer l'évolution de la dégradation des terres à travers l'application d'un modèle d'érosion, le choix de celui-ci est une étape préalable délicate et cruciale pour la réussite de l'étude.

Dans un premier temps, il faut tenir compte des objectifs de l'étude, des caractéristiques physiques et climatiques de la zone étudiée et des données disponibles concernant celle-ci. D'autre part, il est essentiel de prendre connaissance des avantages, inconvénients et limites d'un modèle avant de l'utiliser. Ces éléments sont tout autant reliés aux paramètres du modèle, qu'à ses besoins en données d'intrants ou à ses limites spatiale, temporelle et physique. Ces dernières caractérisent les types des sols, de culture et le climat pour lesquels le modèle peut se montrer

efficace. Un modèle qui n'a pas été conçu pour être utilisable dans le type de région étudiée aboutira nécessairement à des résultats erronés.

Dans le cas d'une étude portant sur la dégradation des terres due à la dynamique agricole au Sud du Mali, on peut par avance imaginer que le choix d'un modèle puisse être conditionné par la disponibilité des données. L'objectif principal de l'étude étant d'identifier l'évolution de la dégradation des terres résultant plus particulièrement de la culture du coton, la parcelle pourrait facilement être envisagée comme échelle spatiale d'application minimale. L'évolution étudiée s'appuie quant à elle sur plusieurs décennies, le modèle choisi devra donc être capable de répondre à ce besoin.

En raison du climat de cette région, et plus précisément à cause de la brièveté, de l'irrégularité mais aussi de l'intensité des pluies, il aurait été idéal de pouvoir appliquer un modèle tel que le KINEROS. Malheureusement, il est impossible de disposer de la quantité des données nécessaires pour cela, et d'autant moins lorsqu'il s'agit de paramètres aussi précis que la microtopographie. L'échelle d'application envisagée rend néanmoins possible de modéliser les pertes de sol à l'aide de modèles plus anciens, tels que l'équation universelle de perte des sols (*Universal Soil Loss Equation*, USLE) et ses dérivés, qui ont prouvé leur efficacité lors de nombreuses applications et dont les avantages et les limites sont de fait bien connus des scientifiques. Ces modèles empiriques, certes souvent moins précis que les modèles physiques plus récents évoqués précédemment, sont cependant plus simples à utiliser et plus faciles à adapter aux caractéristiques variables des régions étudiées. Or l'un des dérivés de l'USLE, le modèle SLEMSA, pourrait être applicable à cette zone d'étude. Une campagne de terrain n'étant cependant pas envisageable, la validation des résultats issus de l'utilisation du modèle risque d'être particulièrement difficile.

### **3. Méthodologie**

Afin d'étudier le phénomène de dégradation des terres dans le terroir d'Umarbugu au Sud du Mali, on tentera d'estimer les pertes de sols dues aux pratiques agricoles. La méthode utilisée peut-être subdivisée en deux parties : dans un premier temps, l'application d'un modèle d'érosion permettra d'obtenir une estimation des pertes de sols entre 2000 et 2006 pour près d'une centaine de champs. Les estimations produites seront comparées aux résultats d'études similaires pour en vérifier la précision. Dans un deuxième temps, on effectuera des simulations de manière à évaluer l'impact éventuel de la mise en place de mesures de conservation mais aussi l'évolution des pertes de sols sur plusieurs décennies. Cette dernière partie permettra également de juger de la sensibilité de certains paramètres du modèle. L'ensemble de la méthodologie appliquée est résumée par l'organigramme méthodologique situé à la figure 4.



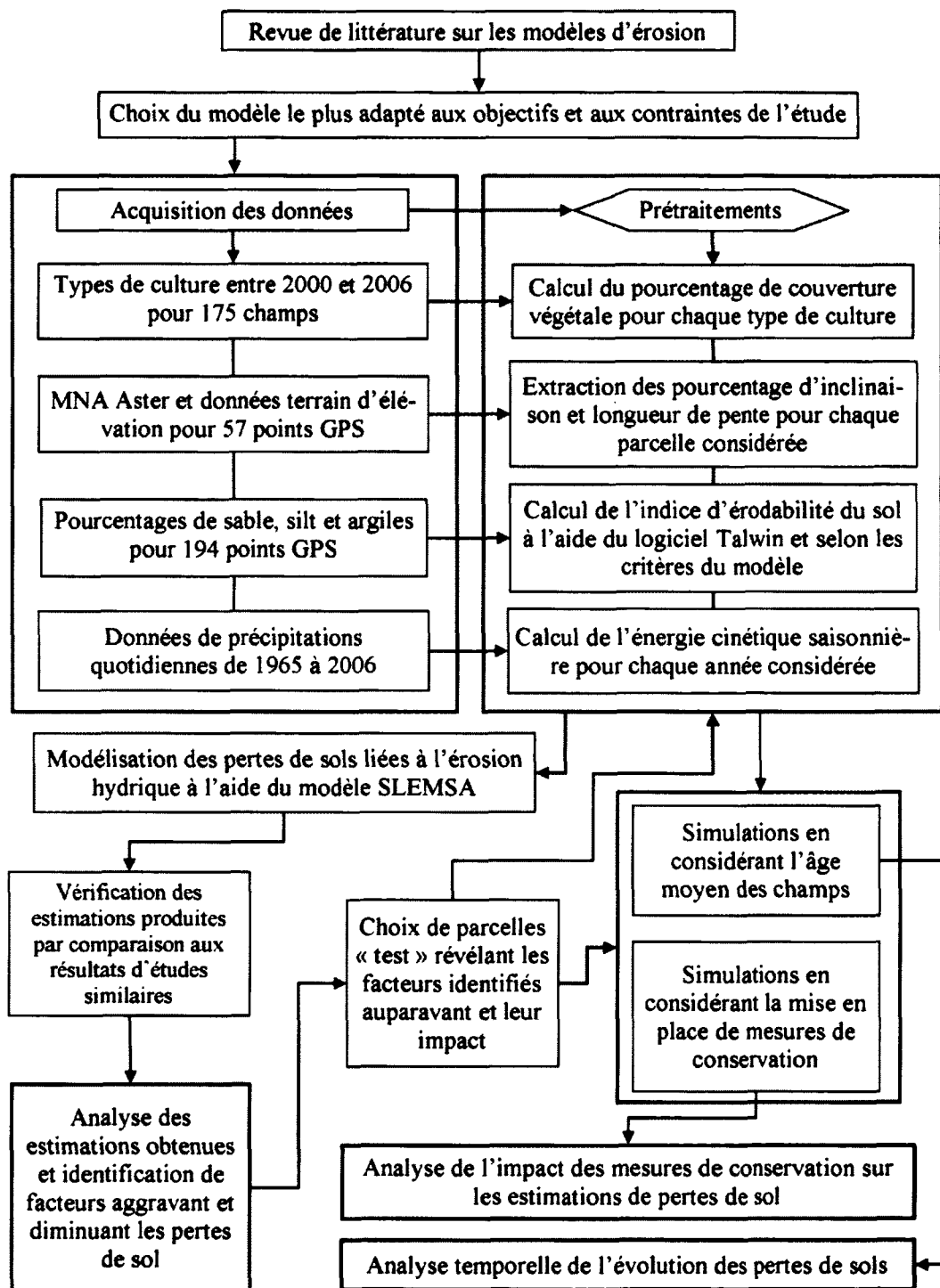


Figure 4. Organigramme méthodologique

### 3.1. Application du modèle SLEMSA

Cette partie de la méthode employée consistera à appliquer un modèle d'érosion des sols à une partie de la zone d'étude occupée par les exploitations agricoles. Le modèle choisi répond à la fois aux contraintes physiques de la région, notamment celles relatives au climat, mais aussi aux contraintes techniques, que constituent par exemple la faible quantité et l'imprécision des données disponibles.

Parmi les nombreux dérivés de l'équation universelle (USLE), on trouve le modèle SLEMSA (*Soil Loss Estimator for Southern Africa*) qui répond davantage aux contraintes physiques de la zone d'étude. En effet, la conception de ce modèle a été motivée par le désir d'adapter l'équation universelle, élaborée pour un climat tempéré (Wischmeier and Smith, 1978), aux régions semi-arides. Cette adaptation impliquait non seulement une modification du facteur climatique, mais aussi la prise en compte de types de sols et de végétation différents (Elwell, 1978).

Le modèle SLEMSA, mis au point à la suite d'expériences menées au Zimbabwe, opère en considérant quatre systèmes physiques intervenant dans le processus d'érosion: le climat, le sol, la culture et la topographie. Ce modèle est composé de trois sous modèles permettant de calculer les paramètres que contient l'équation principale. Le premier sous-modèle (K) permet de calculer les pertes de sols pour un sol nu, le second (C) prend en compte les pratiques culturales et enfin le dernier (X) traduit l'influence des variations de la topographie sur le processus de perte des sols. L'ensemble du modèle prend la forme de l'équation suivante :

$$Z = K \times C \times X \quad (2)$$

#### 3.1.1. Présentation des données

Étant donné le nombre et la diversité des données nécessaires à l'étude, il a été jugé préférable de les présenter sous la forme d'un tableau recensant leur type, leur source et leur date d'acquisition (tableau 1). Par la suite et pour un même souci de clarté, les éventuels prétraitements appliqués à certaines données seront expliqués.

Il s'est avéré impossible pour cette étude d'entreprendre une prise de données sur le terrain. L'acquisition des données s'est donc faite par le biais de L'ICRISAT puisque cet institut avait déjà entrepris des campagnes de terrain et d'investigation auprès des paysans pour plus de deux cent champs autour du terroir d'Umarbugu. Il a donc été possible d'obtenir, pour les besoins du

modèle, les données relatives au sol et aux cultures (entre 2000 et 2006) pour 175 parcelles, ainsi que les limites géographiques de celles-ci. L'ensemble de ces données ayant été fourni sous la forme de deux fichiers excel, elles ont été triées et vérifiées afin de ne sélectionner que les parcelles pour lesquelles on possède toutes les données d'intrant nécessaires au modèle SLEMSA. Il en résulte un lot de 96 parcelles.

**Tableau 1. Description des données**

Type de donnée	Source	Date
Images satellite	DigitalGlobe QuickBird	15.06.2003
	DigitalGlobe QuickBird	03.08.2003
Modèle numérique de terrain	Terra ASTER	-
Données terrain relatives aux pourcentages de sable, de silt et d'argile pour 194 points géoréférencés	Campagne de terrain menée par l'ICRISAT dans le cadre du SM-CRSP	2004
Données terrain relatives aux cultures de 2000 à 2004	Campagne de terrain menée par l'ICRISAT dans le cadre du SM-CRSP	2004
Données terrain relatives aux cultures	Campagne de terrain menée par l'ICRISAT dans le cadre du SM-CRSP	2006
Données climatiques concernant les précipitations de 1965 à aujourd'hui	Station climatique de Koutiala	2006
Limites des 175 parcelles étudiées	ICRISAT	2006

Les modèles numériques de terrain issus d'images ASTER ont une résolution spatiale de 15 mètres et une précision verticale moyenne comprise entre  $\pm 7$  et  $\pm 15$  mètres (Hirano et al., 2002). Dans le but d'évaluer la précision du MNT mentionné dans le tableau 1 et de la corriger éventuellement, il était initialement prévu de le comparer à des données prises sur le terrain. Malheureusement, les données qui ont pu être obtenues se sont révélées être d'une précision inférieure à celle du MNT Aster. Néanmoins, bien que l'échelle de l'étude nécessite des données d'une grande précision, le MNT Aster constitue la donnée la plus précise qu'il était possible

d'obtenir et l'on s'attend à ce que le relief faiblement accidenté de la zone d'étude réduise la marge d'erreur induite par cette donnée (comm. pers. K. Goïta).

### 3.1.2. Le sous-modèle K

Le sous-modèle K, associé à l'érosivité des précipitations, permet en fait de calculer la quantité moyenne annuelle de pertes de sol pour une surface de champ standard, soit 30 m de long sur 10 m de large, sur une pente de 2,5° et pour un sol dont l'érodabilité ( $F$ ) est connue lorsqu'il est nu, en condition de jachère et en l'absence de mauvaises herbes. La variable de contrôle de ce sous-modèle est l'énergie cinétique des précipitations saisonnières ( $E$ ), exprimée en joules par mètre carré. Selon Elwell (1978), la relation entre l'érosivité des précipitations et les pertes de sols sur les terres arables du Zimbabwe peut être calculée par l'équation suivante :

$$\ln K = b \ln E + a \quad (3)$$

Où  $E$  correspond à l'énergie saisonnière des précipitations,  $K$  est la quantité de perte des sols pour un sol nu et selon les caractéristiques énoncées au paragraphe précédent et  $a$  et  $b$  sont les coefficients régissant la relation entre  $E$  et  $K$ . Ces coefficients ont pu être déterminés après une dizaine d'années d'observations sur le terrain en considérant à la fois l'énergie des précipitations, les pertes de sols effectives et l'érodabilité des sols ( $F$ ). Cette dernière variable à elle-même fait l'objet d'études particulières et est utilisée dans le modèle SLEMSA sous la forme d'un indice calculé au moyen du tableau 2. Ainsi, les coefficients  $a$  et  $b$  peuvent être calculés selon les équations suivantes :

$$a = 2,884 - 8,1209F; \quad (4)$$

$$b = 0,4681 + 0,7663F. \quad (5)$$

Le calcul de l'indice  $F$  s'obtient à partir des données de surface du sol relatives aux pourcentages de limons, de sable et d'argile qui la composent. Il existe aujourd'hui des logiciels permettant de déterminer automatiquement le type de sol en fonction de données de surfaces telles que celles que nous possédons et en se basant sur le triangle des textures produit par le Département d'Agriculture des États-Unis (USDA, 2009). Parmi ceux-ci, le logiciel TAL est disponible gratuitement sur internet. Il a donc facilité le calcul de l'indice qui devra par la suite être révisé pour les parcelles sujettes à des mesures de conservation du sol.

**Tableau 2. Méthode de calcul de l'indice d'érodabilité du sol (*F*)**

Texture du sol	Type de sol	Indice de base
Léger	Sable Sable limoneux Limons sableux	4
Moyen	Limons sableux argileux Limons argileux Argile sableux	5
Fort	Argile Argile concentré	6

Soustraire à la valeur de l'indice de base :

- 1 pour les sols légèrement texturés essentiellement composés de sable et de silt;
- 1 pour une perméabilité verticale réduite à 1 mètre ou moins sous la surface, ou pour un sol particulièrement encroûté;
- 1 lors de la présence de rigoles en haut et en bas de la pente;
- 1 dans le cas d'une détérioration de la structure du sol due à des pertes de sol excessive au cours des années précédentes ( $> 20 \text{ t ha}^{-1}$ ) ou en l'absence de pratiques de conservation du sol;
- 0,5 pour une surface légèrement à modérément encroûtée ou pour des pertes de sols comprises entre 10 et  $20 \text{ t ha}^{-1}$ .

Ajouter à la valeur de l'indice de base :

- 2 pour un sol à texture fine, bien drainé en profondeur ( $> 2 \text{ m}$ );
- 1 lorsque les pratiques culturales appliquées encouragent la rétention d'eau à la surface (par exemple une butte entourant la parcelle);
- 1 lorsque les pratiques culturales encouragent l'infiltration et le stockage de l'eau à l'intérieur des parcelles;
- 1 pour une première saison sans pratiques culturales;
- 2 pour des saisons sans pratiques culturales postérieures.

---

*Source : traduit d'Elwell (1978)*

Dans un deuxième temps, on dispose d'une série de données de précipitations quotidiennes enregistrées entre 1965 et 2006 par la station de Koutiala située à une trentaine de kilomètres d'Umarbugu. À partir de cette série de données, il s'agira de calculer l'énergie saisonnière des

précipitations, en  $J/m^2$ . Celle-ci peut être estimée à l'aide d'une équation de régression associée à la moyenne annuelle des précipitations, en millimètres (Stocking *et al.*, 1988).

$$E = 18,84 \times P \quad (6)$$

Où  $P$  est la quantité moyenne annuelle de précipitations en mm et  $E$ , l'énergie cinétique en joules/m<sup>2</sup>/an.

Étant donné le climat de la zone d'étude, composé d'une saison sèche et d'une saison des pluies bien distinctes, il a été jugé plus logique de ne considérer, dans le calcul de  $E$ , que les valeurs associées à la période correspondant à la saison des pluies. Afin de calculer l'énergie cinétique saisonnière, on a donc d'abord effectué la somme des valeurs quotidiennes relevées entre juin et septembre pour chaque année entre 1965 et 2006.

### 3.1.3. Le sous-modèle C

Le sous-modèle représentant la culture (C) permet de tenir compte de l'influence du couvert végétal des cultures sur la dégradation des sols. Il s'agit de calculer le coefficient d'interception des précipitations ( $i$ ) à partir du pourcentage de couverture végétale et de l'énergie moyenne saisonnière des pluies ( $E$ ). Le pourcentage de couverture végétale sera obtenu à l'aide des données relatives aux cultures entre 2000 et 2006 (ICRISAT) et des taux de couvert végétal moyen extraits de la littérature (Morgan, 2005; Stocking *et al.*, 1988) pour chaque type de culture considéré.

Afin d'obtenir le coefficient d'interception des précipitations, il faut au préalable calculer le taux de couverture végétale pour chaque période de dix jours, puis le pondérer par le pourcentage d'énergie cinétique saisonnière des précipitations correspondant à la même période. Les résultats obtenus pour chaque période seront alors additionnés pour obtenir le coefficient d'interception correspondant à la saison. Ce dernier permet ensuite d'ajuster les pertes de sols modélisées pour les sols nus de la manière suivante :

$$C = e^{(-0.06i)} \quad (7)$$

Dans le terroir d'Umarbugu, on cultive principalement du coton, du sorgho, du mil, du maïs et quelques variétés de légumes et de légumineuses en culture de contre-saison (comm. pers. K. Goïta). Après avoir effectué une analyse approfondie des données fournies par l'ICRISAT concernant les cultures issues des 96 champs sélectionnés entre 2000 et 2006, on a constaté que

16 d'entre eux étaient davantage utilisés pour les cultures de contre-saison. Or on tente ici d'appliquer le modèle SLEMSA uniquement aux cultures entreprises durant la saison des pluies, de fait, tenir compte des parcelles utilisées pour les cultures de contre-saison pourrait amplifier l'écart entre l'estimation du modèle et la réalité.

Par ailleurs, les taux de couverture végétale moyens associés au sorgho, au mil et au maïs étant très similaires, ils ont été regroupés. Ainsi, on considère finalement trois types de couvert végétal : le coton, les céréales et la jachère. Le tableau 3 présente les valeurs de couverture maximum moyenne pour les trois types de végétation considérés.

**Tableau 3. Couvert végétal moyen selon les types de cultures.**

Type de culture	Pourcentage moyen de couverture végétale maximale
Coton	52 %
Céréales	60 %
Jachère	100 %

*Sources : Morgan (2005)*

#### **3.1.4. Le sous-modèle X**

Le sous-modèle associé à la topographie (X) permet d'ajuster les pertes de sols modélisées pour les conditions standards considérées dans le sous-modèle K (voir section 3.1.2) aux conditions topographiques réelles. La valeur de  $X$  s'obtient par l'équation suivante :

$$X = (L)^{0.5}[(0,76 + 0,53s + 0,076s^2)/25,65] \quad (8)$$

Où  $L$  est la longueur de pente en mètre et  $s$  est le pourcentage d'inclinaison de la pente.

Pour obtenir  $L$  et  $s$ , on s'appuie sur un modèle numérique de terrain issu du capteur Aster. Grâce aux outils du logiciel ArcGIS 9.2 inclus dans l'extension *Spatial Analyst*, on peut extraire d'une part le sens de l'écoulement mais aussi le degré et la longueur des pentes que parcourent les précipitations.

### **3.2. Simulations**

Les simulations effectuées ici consistent à appliquer le modèle SLEMSA en incluant des données élaborées à partir de données réelles et d'éléments connus issus de communications personnelles

(K. Goïta, 2010 et S. Traoré, 2009). Elles se divisent en deux parties distinctes : la simulation temporelle des données relatives aux cultures et la simulation de mesures de conservation des sols.

### **3.2.1. Simulation temporelle des données relatives aux cultures**

Les données relatives aux précipitations qui ont été obtenues couvrent une période de plus de quarante ans. Il a donc été jugé intéressant d'appliquer le modèle à une longue période de temps afin d'examiner d'une part l'évolution des pertes de sols au fil du temps sous le climat particulier auquel est soumise la région étudiée.

Cependant, on ne possède malheureusement des données concernant les cultures que pour sept années (de 2000 à 2006 inclusivement) et il serait très difficile, voir même impossible, de remonter davantage dans le passé. Par ailleurs, la rotation des cultures ne présente pas de réelle alternance régulière ou répétitive. Afin de remédier à ce problème, il a été jugé acceptable de répéter la séquence connue pour chaque période de six ans jusqu'en 1965. En effet il est très probable que cela tombe juste (comm. pers. K. Goïta).

On s'attend à ce que ces simulations révèlent davantage et précisent éventuellement les facteurs d'influence du processus de dégradation des sols.

### **3.2.2. Simulation de mesures de conservation des sols**

Depuis quelques années déjà, certains organismes tentent de sensibiliser les populations rurales aux problèmes environnementaux qui les menacent. C'est le cas dans le terroir d'Umarbugu où certains paysans ont commencé à appliquer la culture en courbes de niveau afin de minimiser l'érosion des sols. Cette pratique consiste en fait à mettre en place des monticules de terres en travers de la pente, le long des courbes de niveau, afin de retenir, sinon de ralentir, l'écoulement des précipitations. Le modèle SLEMSA permet de tenir compte d'une telle pratique en modifiant simplement l'indice d'érodabilité du sol tel que présenté au tableau 2 de la section 3.1.2.



## 4. Résultats, analyse et validation

### 4.1. Estimations obtenues par l'application du modèle SLEMSA

Dans cette partie de l'étude, les résultats de chaque sous-modèle seront présentés successivement afin d'être validés par comparaison, lorsque cela est possible, aux résultats d'études antérieures effectuées dans des environnements similaires. En effet, comme il a été précisé précédemment, le contexte de cette recherche n'a pas permis de validation par comparaison à des mesures prises sur le terrain. On suppose que de s'assurer de la cohérence des données étape par étape permettra d'assurer l'efficacité reconnue du modèle (Elwell, 1978; Morgan, 2005).

#### 4.1.1. Le sous-modèle K

Considérant que, à cette étape de la recherche, on ne tient pas compte d'éventuelles mesures de conservation appliquées aux parcelles, les coefficients  $a$  et  $b$  ont été calculés avec un indice d'érodabilité du sol de 4.

Le tableau 4 illustre une partie des résultats obtenus par l'élaboration du sous-modèle  $K$  et leur comparaison aux résultats obtenus par Elwell (1978) pour des sols correspondant au même indice  $F$  et pour des valeurs de  $E$  similaires.

**Tableau 4. Validation par comparaison des résultats obtenus pour le sous-modèle K**

Indice $F$	$E$ (j/m <sup>2</sup> )	K (t/ha/année)	$E$ (j/m <sup>2</sup> ) Elwell	K (t/ha/année) Elwell
4	16 274	106	15 950	98
4	15 805	96	15 770	95
4	14 222	66	14 290	67
4	14 884	77	15 660	92

*Source :Elwell (1978)*

Le tableau 5 quant à lui permet de constater la grande irrégularité de la quantité d'eau reçue par le sol d'une année à l'autre et permet donc d'envisager la variabilité de la quantité de perte de sol d'année en année.

**Tableau 5. Exemple de résultats obtenus par le calcul du sous-modèle K**

Année	Total pmm/saison	$E$ (j/m <sup>2</sup> )	K (t/ha/année)
1980	593	11 174	28
1981	754	14 211	66
1982	714	13 448	54
1983	722	13 597	56
1984	406	7 657	7
1985	742	13 977	62
1986	749	14 119	64
1987	620	11 675	33
1988	864	16 274	106
1989	557	10 498	23
1990	913	17 205	129
1991	695	13 099	49
1992	606	11 425	30
1993	661	12 448	41
1994	1068	20 112	224
1995	657	12 376	40

#### **4.1.2. Le sous-modèle C**

Le tableau 6 présente les résultats obtenus par le calcul du coefficient d'interception des précipitations ( $i$ ), puis par l'application du sous-modèle C, et ce pour chaque type de couvert végétal considéré entre 2000 et 2006. On peut constater que l'érosivité des précipitations est davantage freinée par les cultures de céréales que par la culture du coton, et bien sûr que les périodes de jachère sont un très bon moyen d'accroître temporairement la fonction protectrice de la végétation sur les sols. On s'attend à ce que cela apparaisse également à l'analyse des estimations finales du modèle SLEMSA.

**Tableau 6. Résultats du sous-modèle C**

Année	Culture	<i>I</i>	<i>C</i>
2000	Coton	26,66	0,202
	Céréales	30,63	0,159
	Jachère	50,77	0,048
2001	Coton	28,88	0,177
	Céréales	33,18	0,137
	Jachère	55,00	0,037
2002	Coton	30,49	0,161
	Céréales	35,03	0,122
	Jachère	58,07	0,031
2003	Coton	27,80	0,189
	Céréales	31,95	0,147
	Jachère	52,95	0,042
2004	Coton	29,96	0,166
	Céréales	34,42	0,127
	Jachère	57,06	0,033
2005	Coton	29,44	0,171
	Céréales	33,83	0,131
	Jachère	56,07	0,035
2006	Coton	24,49	0,230
	Céréales	28,14	0,185
	Jachère	46,65	0,061

La validation des valeurs produites par ce sous-modèle est très difficile car c'est en particulier au niveau de celui-ci que les études antérieures diffèrent. Par exemple, certaines recherches considèrent l'année entière, incluant ainsi les cultures de contre-saison, et les scientifiques ont entrepris de simplifier quelque peu le calcul de ce facteur afin d'englober davantage de données.

#### 4.1.3. Le sous-modèle X

La carte de la figure 5 permet de constater que l'inclinaison des pentes, au sein des limites des parcelles considérées à l'étude, n'excède pas 6 %. On remarque aussi sur la carte la très grande variabilité des surfaces cultivées qui induit des valeurs de  $L$  allant de 10 m à 400 m.

L'observation globale des données concernant l'aspect topographique de la zone d'étude permet d'émettre plusieurs remarques : dans un premier temps on constate que les parcelles caractérisées par une forte inclinaison de pente sont plutôt rares et que, lorsque c'est le cas, elles sont généralement plus petites que les autres. Cela ne signifie pas pour autant que les parcelles les plus grandes soient systématiquement caractérisées par une pente faible et on aurait tendance à penser que la petite taille de certains champs résulterait davantage des contraintes imposées par le relief que d'un souci de conservation du cultivateur ayant constaté l'inclinaison plus forte des pentes.

Afin de vérifier la cohérence des valeurs de  $X$  obtenues ici, elles seront comparées dans le tableau 7 aux valeurs obtenues par Bobe (2004).

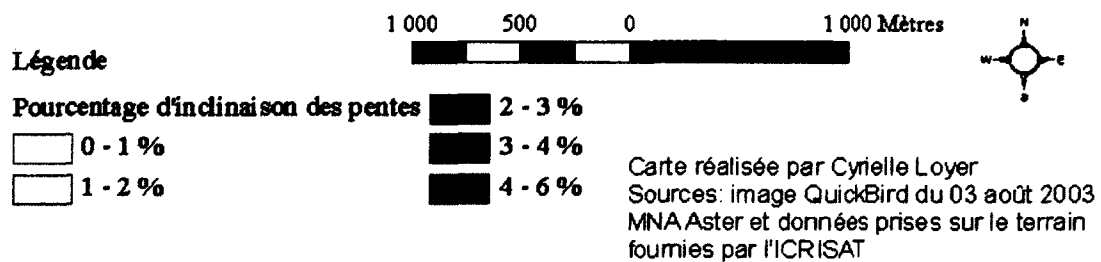
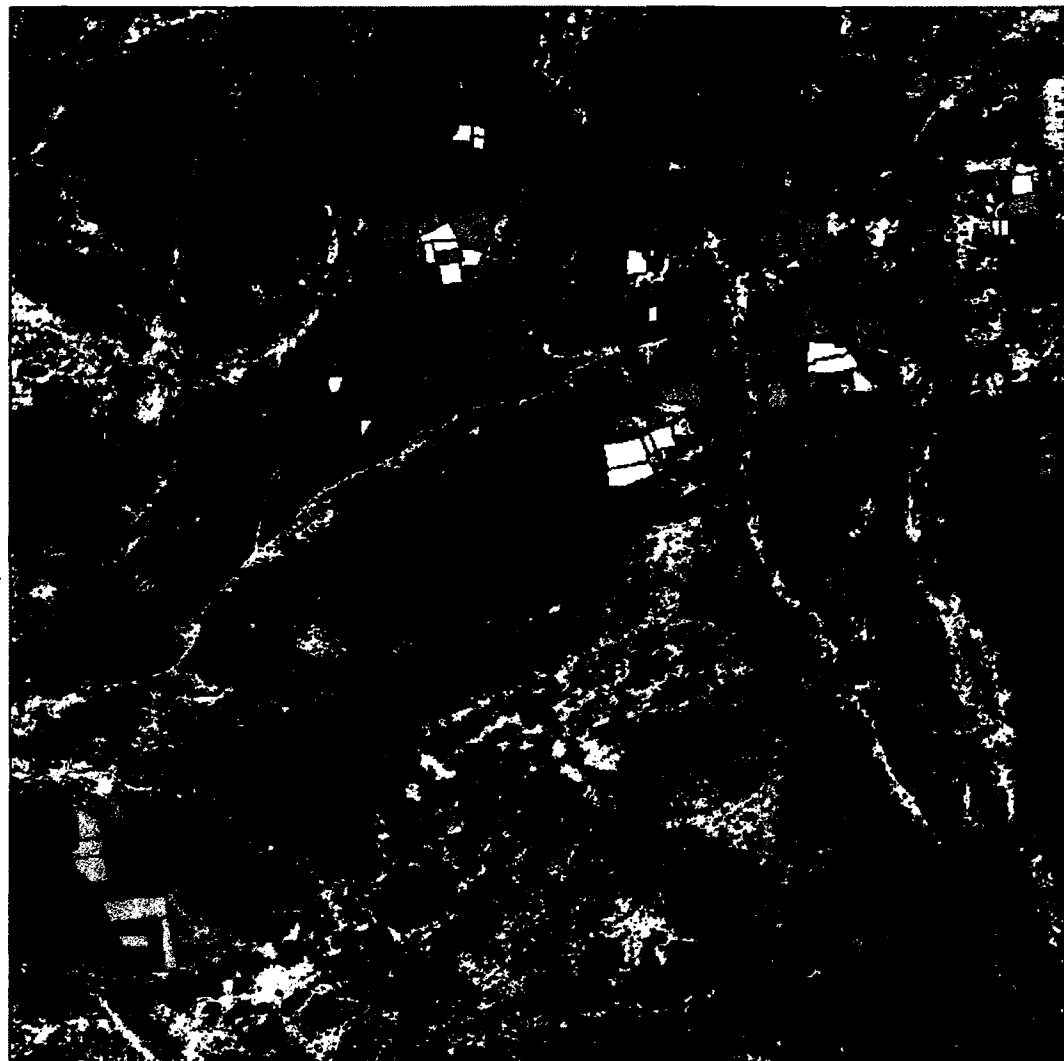
**Tableau 7. Validation par comparaison des valeurs obtenues pour le sous-modèle X**

Valeurs de comparaison (Bobe, 2004)			Valeurs obtenues		
$s$ (%)	$L$ (m)	$X$	$s$ (%)	$L$ (m)	$X$
1	200	0.75	0.95	196.57	0.73
			1.18	187.28	0.79
2	300	1.43	2.68	319.71	1.90
			2.17	374.56	1.71

*Source : Bobe (2004)*

La comparaison des données permet de démontrer que les calculs ont été effectués correctement mais ne donne pas une idée précise du rapport entre les estimations et la réalité. Cependant, on espère qu'une telle validation permettra d'aboutir à des résultats finaux dont la précision serait comparable à celle démontrée par les applications antérieures du modèle SLEMSA.

# Pourcentage d'inclinaison des pentes au sein des limites des cultures



**Figure 5. Carte d'inclinaison des pentes à l'intérieur des limites des parcelles**

#### **4.2. Estimations obtenues par l'application du modèle SLEMSA aux données réelles**

Considérant la grande variabilité des dimensions des surfaces cultivées mais aussi l'irrégularité des précipitations, il est logique de s'attendre à des estimations de pertes de sols qui diffèrent largement d'une parcelle à une autre, mais aussi d'une année sur l'autre. Les cartes des figures 7 et 8, représentant les taux de pertes de sols (en tonnes par hectare par année) calculés pour les années 2002 et 2003, illustrent bien ces phénomènes.

On constate dans un premier temps la sensibilité du modèle aux données relatives à l'érosivité des précipitations, sachant qu'en 2002 la zone d'étude a reçu deux fois moins de pluie qu'en 2003 et qu'il s'agit par ailleurs, au regard de l'ensemble des données, d'une année relativement sèche.

L'analyse de l'ensemble des estimations de pertes des sols pour les années 2000 à 2006 (voir l'annexe 1 pour les cartes concernant les années 2000, 2001, 2004, 2005, 2006) permet également de remarquer que les pertes de sols augmentent de façon générale, or l'érosivité des précipitations ne s'intensifie pas de manière significative au cours de cette période. En revanche, si l'on observe d'avantage les données relatives aux types de cultures appliquées aux champs considérés, on constate que la culture du coton progresse alors que la pratique de la jachère connaît quant à elle une diminution drastique. L'histogramme de la figure 6 illustre ce phénomène.

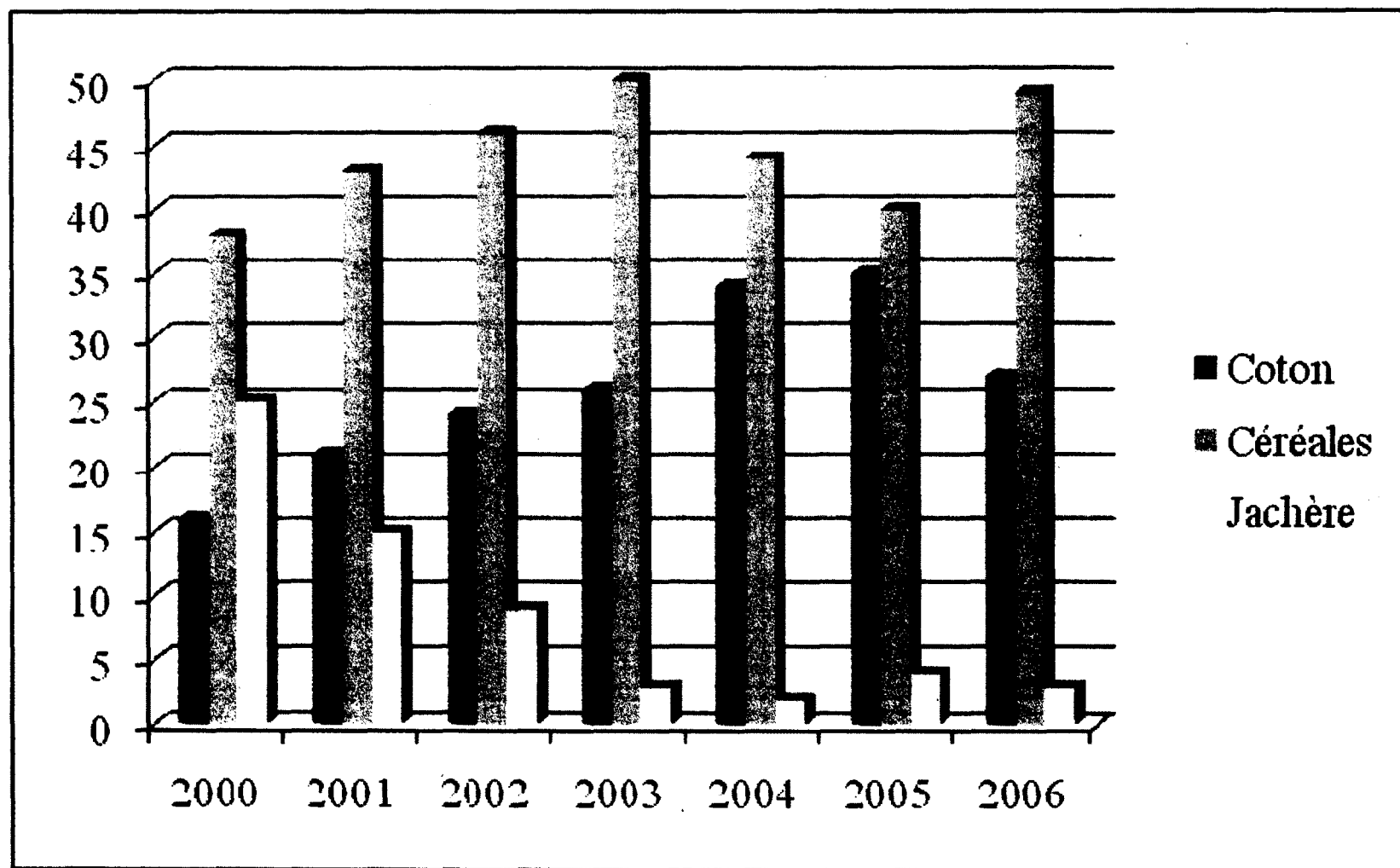


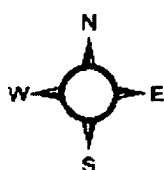
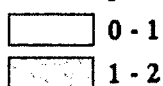
Figure 6. Répartition des cultures par année

Estimations produites par le modèle SLEMSA des taux de pertes des sols (en t/ha/année)  
pour l'année 2002



**Légende**

Taux de pertes de sols en t/ha/année



1 000 500 0 1 000 Mètres

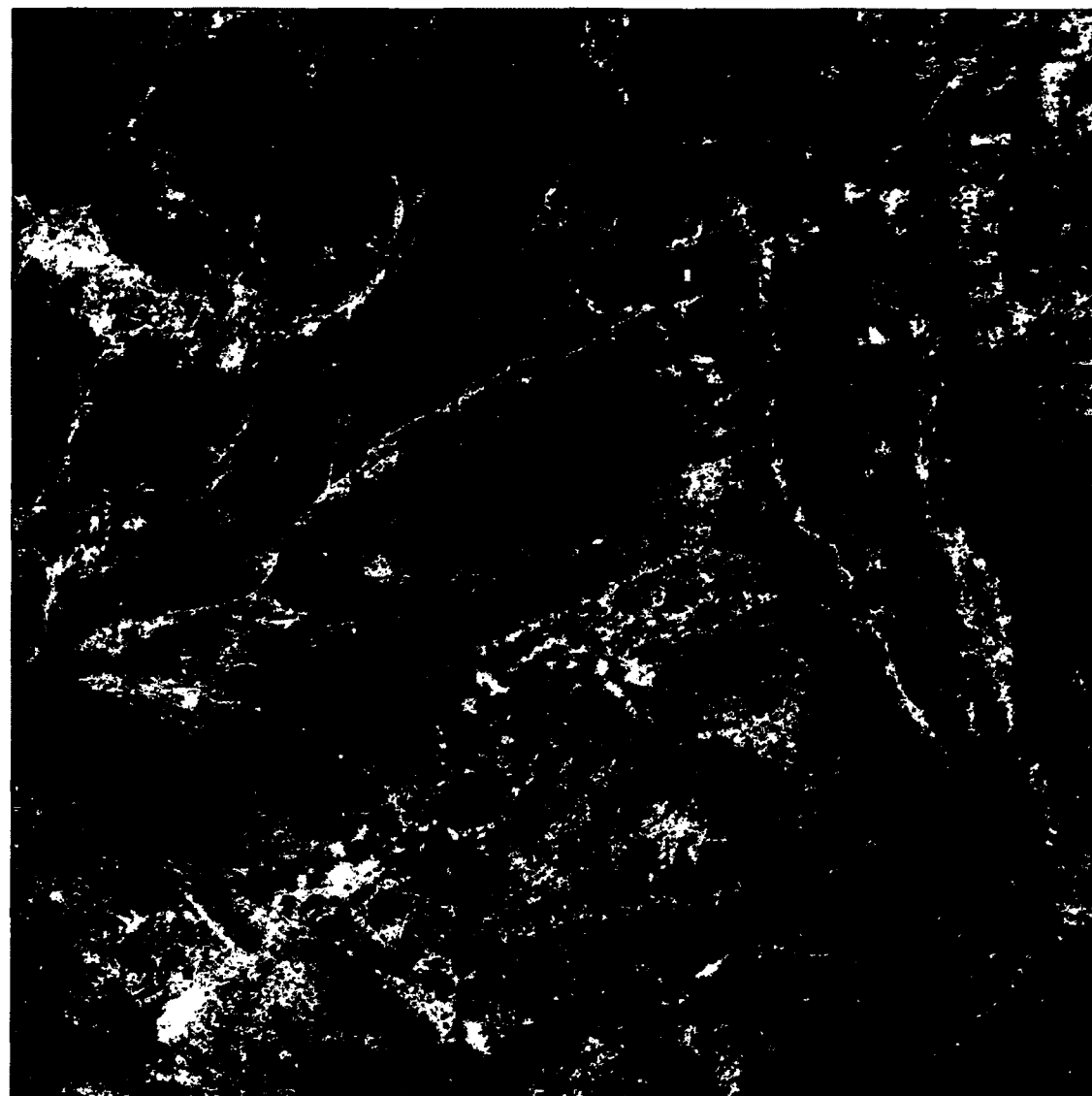


Carte réalisée par Cyrielle Loyer  
Sources: image QuickBird du 03 août 2003  
MNA Aster et données prises sur le terrain  
fournies par l'ICRISAT

**Figure 7. Carte des taux de pertes de sol pour 2002**

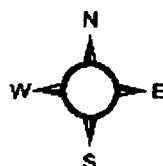
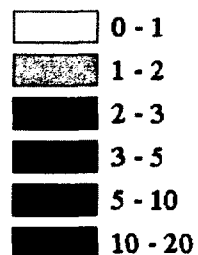


Estimations produites par le modèle SLEMSA des taux de pertes des sols (en t/ha/année)  
pour l'année 2003



Légende

Taux de pertes en sols en t/ha/année



1 000 500 0 1 000 Mètres



Carte réalisée par Cyrielle Loyer  
Sources: image QuickBird du 03 août 2003  
MNA Aster et données prises sur le terrain  
fournies par l'ICRISAT

Figure 8. Carte des taux de pertes de sols pour 2003

La comparaison des résultats avec des pertes de sols mesurées sur le terrain étant impossible, il a été jugé acceptable de s'appuyer sur des estimations produites par des recherches antérieures dans un environnement comparable à celui de la présente étude afin de valider celle-ci. Cependant, les recherches antérieures auxquelles on fait référence ici sont souvent plus poussées, tant dans le temps que dans l'application du modèle, dont certains paramètres sont par exemple ajustés au moyen d'observations réelles. De ce fait, il serait délicat et peu logique de comparer les estimations finales de pertes de sols produites ici à ceux obtenus par Bobe (2004), Stocking *et al.* (1988) ou encore Elwell (1978) lui-même. En conséquence, on a appliqué ce type de validation par comparaison aux résultats de chaque sous-modèle composant le modèle SLEMSA, en recherchant au préalable le maximum de similitudes environnementales entre les parcelles considérées ici et celles étudiées lors des recherches antérieures.

S'il est difficile de comparer les résultats obtenus suite à l'application du modèle SLEMSA à ceux obtenus dans des conditions similaires et issus du même modèle, il est néanmoins possible de les évaluer en les confrontant à ceux issues de quelques-unes des nombreuses applications du modèle USLE dans cette région du monde. Le modèle SLEMSA étant moins souvent appliqué que l'USLE, ce type de comparaison est en réalité fréquent (Morgan, 1997; Bobe, 2004; Mulders *et al.*, 1996). Il ne faut cependant pas oublier qu'il s'agit de deux modèles différents, tant du point de vue des calculs sous-jacents que des paramètres pris en compte.

Prenons par exemple les recherches entreprises par Senhaoun (2001) dans la région de Borgou au Bénin. Suite à l'application du modèle USLE aux cultures de coton de ce site d'étude, caractérisé par un relief peu accidenté et une saison des pluies similaire à celle d'Umarbugu, la moyenne des estimations de pertes de sols calculées en 1993 et 1994 était d'environ 12 t/ha/année. Pour la même période, et uniquement pour les cultures de coton, les estimations obtenues par la présente application du modèle SLEMSA étaient d'en moyenne 10 t/ha/année.

L'application du modèle SLEMSA aux 80 parcelles du terroir d'Umarbugu a permis de mettre en évidence d'une part la grande sensibilité du modèle à l'érosivité des précipitations, telle que soulevées par Bobe (2004). Par exemple, sur la carte de la figure 7, on constate que les pertes de sols n'excèdent pas 2 t/ha/an tandis que l'année suivante, en 2003, la quantité d'eau reçu au cours de la saison équivaut à deux fois celle enregistrée en 2002 et les pertes de sols dépassent les 10 t/ha/an pour certaines parcelles.

D'autre part, la présente recherche a permis d'identifier les différents facteurs pouvant accroître les taux de pertes de sols. En effet, l'analyse des résultats révèle des taux plus élevés lorsqu'il s'agit d'une culture de coton, d'une parcelle vaste ou caractérisée par une forte inclinaison de pente.

#### **4.3. Estimations obtenues par l'application du modèle aux données simulées**

Une fois la mise en place du modèle effectuée et son efficacité démontrée, on effectue deux types de simulations. Dans un premier temps, il s'agit d'appliquer le modèle à une plus vaste période en remontant dans le temps, soit de 1965 à 1999. Dans un deuxième temps, on reprendra les estimations pour la période allant de 2000 à 2006 afin d'y intégrer, à travers le facteur  $F$  inclus dans le sous-modèle K, la pratique de certaines mesures de conservation des sols.

##### **4.3.1. Simulation temporelle des données relatives aux cultures**

L'objectif de cette simulation est d'évaluer l'évolution des taux de pertes en sols à travers plusieurs décennies. On possède pour cela les données relatives aux précipitations ainsi qu'au relief et à l'érodabilité des sols puisque l'on considère que sur un tel laps de temps ces deux dernières variables n'ont pas connu de changement suffisamment significatif pour modifier les paramètres d'intrants du modèle. Les données manquantes, soit celle concernant les cultures appliquées aux parcelles, seront simulées tel qu'évoqué à la section 3.2.1, c'est-à-dire en dupliquant la séquence connue sur les années antérieures.

Bien que les calculs aient été appliqués à l'ensemble des parcelles étudiées, on a choisi de présenter ici les résultats de quatre d'entre elles, illustrés par le graphique de la figure 9 choisies selon les critères suivants :

- Une inclinaison de pente faible pour une grande parcelle (soit  $s = 1,29 \%$  et  $L = 413 \text{ m}$ );
- Une inclinaison de pente forte pour une grande parcelle (soit  $s = 3 \%$  et  $L = 300 \text{ m}$ );
- Une inclinaison de pente faible pour une petite parcelle (soit  $s = 2 \%$  et  $L = 62 \text{ m}$ );
- Une inclinaison de pente forte pour une petite parcelle (soit  $s = 5,77 \%$  et  $L = 28 \text{ m}$ ).

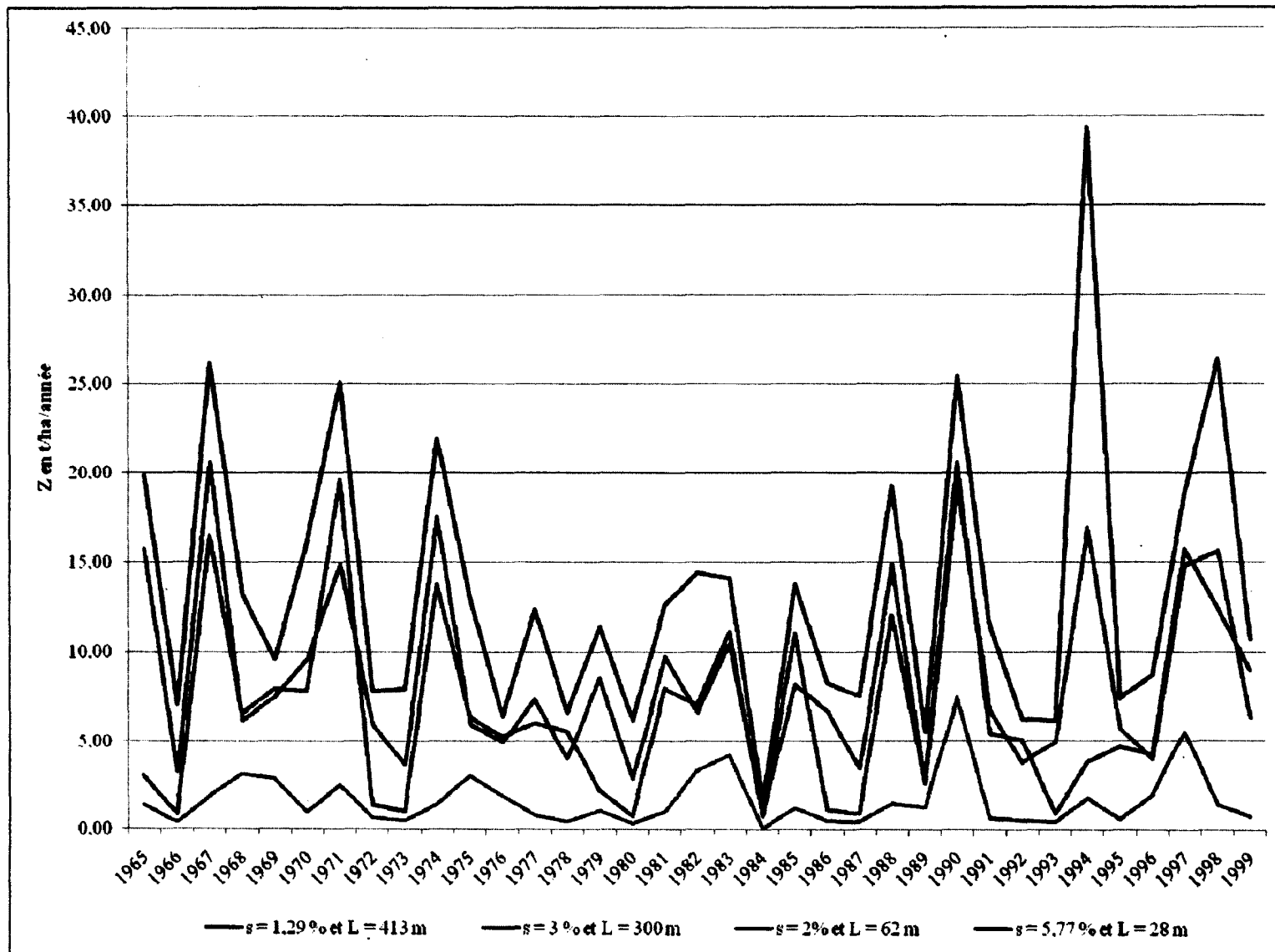
On remarque une grande variation du taux de pertes de sols annuel pour l'ensemble des champs choisis, soit un écart moyen de 5 t/ha/année pour la période étudiée. Cela est directement lié à la très grande irrégularité des précipitations d'une année à l'autre dans la région étudiée. En effet,

entre 1965 et 1999, la quantité de précipitations reçues au cours de la saison des pluies varie de 406 mm à 1067 mm et, parallèlement, les taux moyen de pertes de sols oscillent entre moins de 1 tonne et plus de 22 tonnes par hectare.

On distingue par ailleurs que les parcelles plus grandes enregistrent presque toujours des valeurs de  $Z$  (pertes en sols en t/ha/an) plus élevées. Si l'on compare plus précisément la parcelle de petite taille dont la pente a une forte inclinaison (près de 6 %) à celle de grande taille caractérisée par une faible inclinaison (1,3 %), on pourrait s'attendre à ce que la plus petite enregistre des taux de pertes de sols en tonne par hectares plus élevés. Pourtant, c'est généralement l'inverse, et les rares années pour lesquelles le taux de pertes de sols sur la plus petite parcelle dépassent ceux estimés pour la plus grande correspondent, au regard de l'ensemble des données, à une culture de coton sur la première et à une culture de céréales sur la seconde.

Le choix de parcelles aux caractéristiques topographiques si différentes a également permis de constater que la forte corrélation entre l'érosivité des précipitations et les estimations produites par le modèle SLEMSA s'applique surtout aux grandes parcelles ( $r = 0,92$ ). En effet, l'analyse des coefficients de corrélation ( $r$ ) entre les différentes variables et les estimations finales révèle que pour les plus petites parcelles la culture appliquée a davantage d'importance ( $r = 0,67$ ) que la variable climatique ( $r = 0,57$ ).

Une petite parcelle avec une faible pente semble être le contexte idéal pour un faible taux de pertes de sols. Ceci s'explique notamment par le fait que ces parcelles font l'objet de plus de soins que les parcelles les plus grandes et sont souvent davantage protégées par la végétation (comm. pers. K. Goïta). Par ailleurs, une pente plus courte diminue logiquement l'effet de l'inclinaison de celle-ci sur les estimations produites par le modèle SLEMSA.



#### 4.3.1. Simulation de mesures de conservation des sols

Dans le terroir d'Umarbugu, certains paysans ont appliqué au cours des dernières années une certaine mesure de conservation des sols appelée la culture en courbes de niveau. Cette mesure consiste à mettre en place des billons perpendiculairement à la pente afin de favoriser la rétention de l'eau et de limiter la dégradation des sols (comm. pers. S. Traore, 2009). Malheureusement, il s'est avéré impossible d'identifier précisément les parcelles sujettes à de telles pratiques. Néanmoins, considérant l'intérêt de la prise en compte d'un tel paramètre au sein du modèle SLEMSA, on a choisi de l'appliquer à 10 parcelles (voir tableau 8), 5 d'entre elles caractérisées par les pentes les plus fortes et 5 autres présentant les valeurs de  $L$  (longueur de pente) les plus grandes. Ce choix a été guidé par l'observation des résultats présentés à la section 4.2 révélant l'importance de la taille des parcelles et de l'inclinaison des pentes dans le processus d'érosion des sols en agriculture.

**Tableau 8. Valeurs de  $s$  (pourcentage d'inclinaison) et de  $L$  (longueur de pente) pour les 10 parcelles choisies.**

Parcelle	$s$	$L$
1	1,29	412,84
2	3,43	28,28
3	3,07	299,71
4	2,17	374,56
5	2,68	319,71
6	3,63	52,43
7	3,50	72,43
8	5,77	28,28
9	3,79	68,28
10	2,08	296,99

L'objectif de telles simulations était d'évaluer l'impact de la mise en place de la culture en courbes de niveau sur les taux de pertes de sols. Les figures 10, 11 et 12 présentent les résultats obtenus comparés aux précédents taux calculés sans tenir compte d'éventuelles pratiques de conservation pour les années 2000, 2001 et 2002. Les trois années représentées dans ces graphiques ont l'avantage d'être associées à des valeurs de  $K$  différentes les unes des autres puisque les quantités de précipitations et leur répartition tout au long de la saison varient

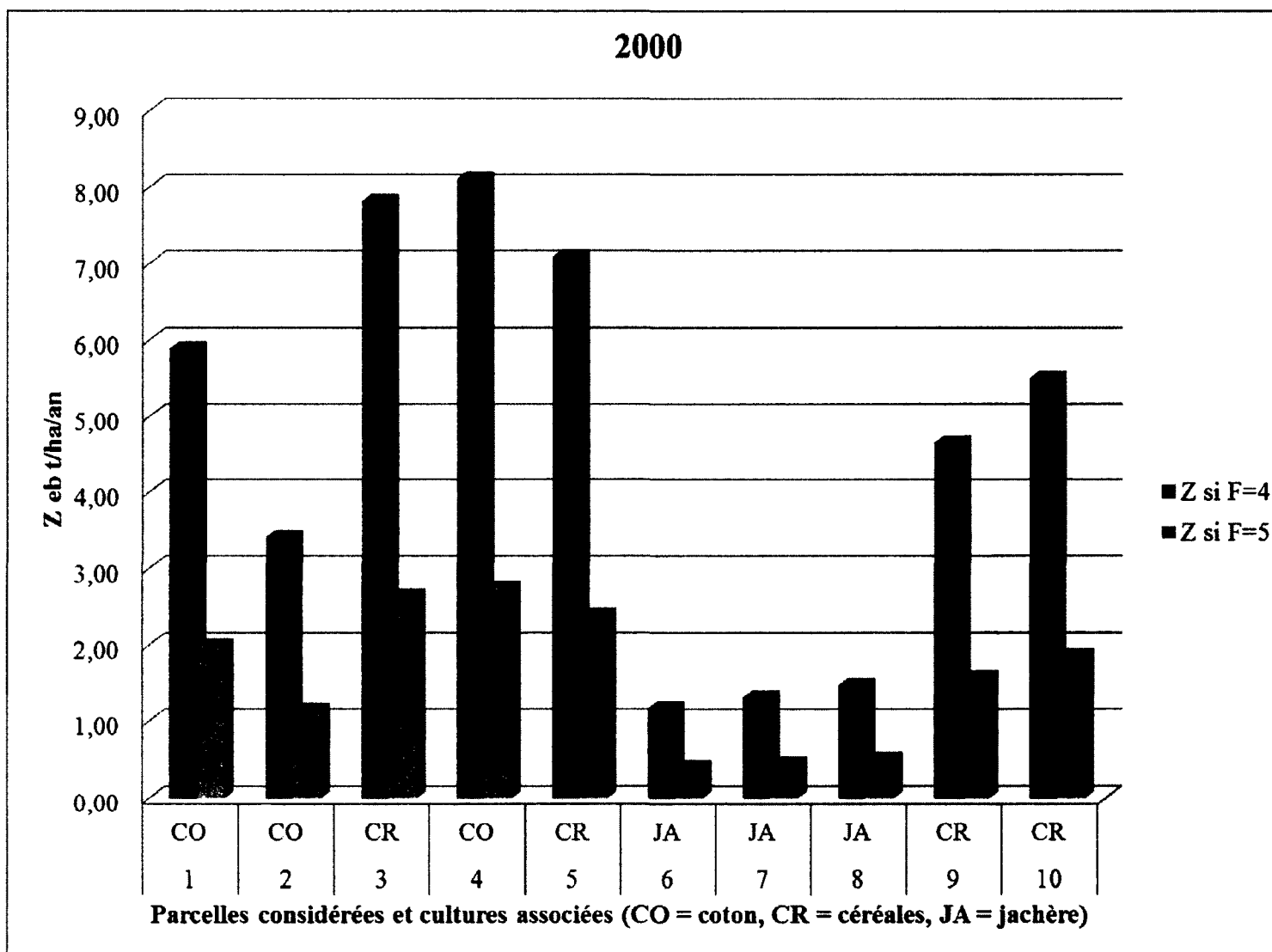
beaucoup d'une année à l'autre. Les graphiques illustrant la diminution des pertes en sols résultant de la considération de pratiques de conservation pour les années 2003 à 2006 peuvent être consultés à l'annexe 2 (p. 61).

On constate que les pratiques de conservation influencent de manière très significative les pertes de sols. En effet, on observe pour l'ensemble des parcelles sélectionnées une diminution moyenne de plus de 65 % des taux de pertes de sols (voir tableau 9). On remarque par ailleurs que plus l'érosivité des précipitations est forte et plus l'impact des mesures de conservation des sols est significatif. Il est néanmoins logique que ces deux éléments apparaissent étroitement reliés puisqu'ils conditionnent conjointement le calcul du sous-modèle K.

**Tableau 9. Pourcentage de diminution des pertes de sols entre les estimations obtenues sans pratiques de conservation (Zr) et les estimations issues de la simulation de telles pratiques (Zs).**

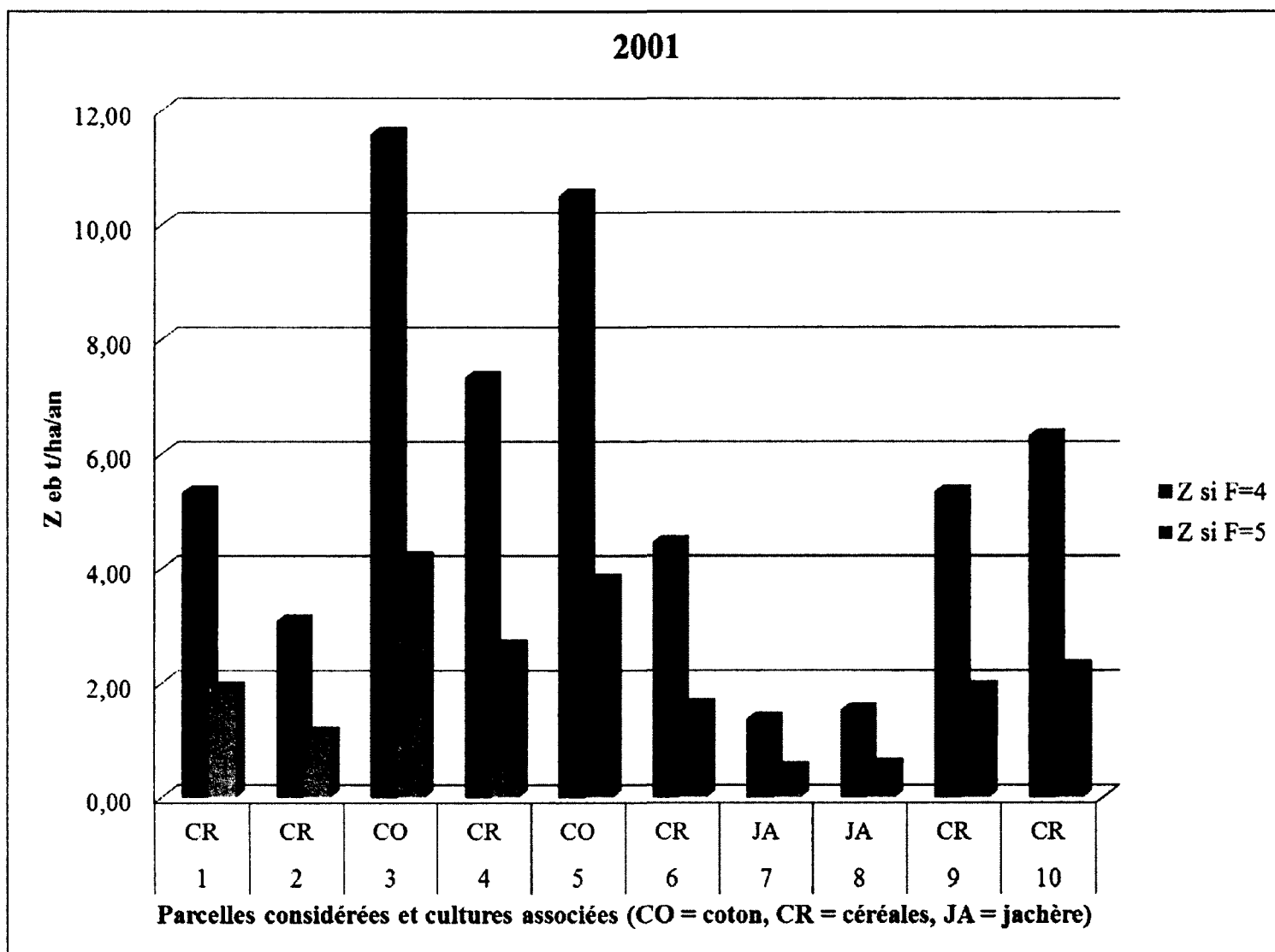
Année	Zr - Zs en %
2000	66,11
2001	63,92
2002	75,64
2003	60,32
2004	65,60
2005	63,29
2006	63,00

Les résultats obtenus à la suite de ces simulations soulignent une fois encore la faible protection que constitue la culture du coton contre l'érosivité des précipitations (voir figure 11) ainsi que le moindre impact des petites parcelles sur les taux de pertes en sol comparativement aux grandes parcelles (voir figure 10 et annexe 2 p. 61).

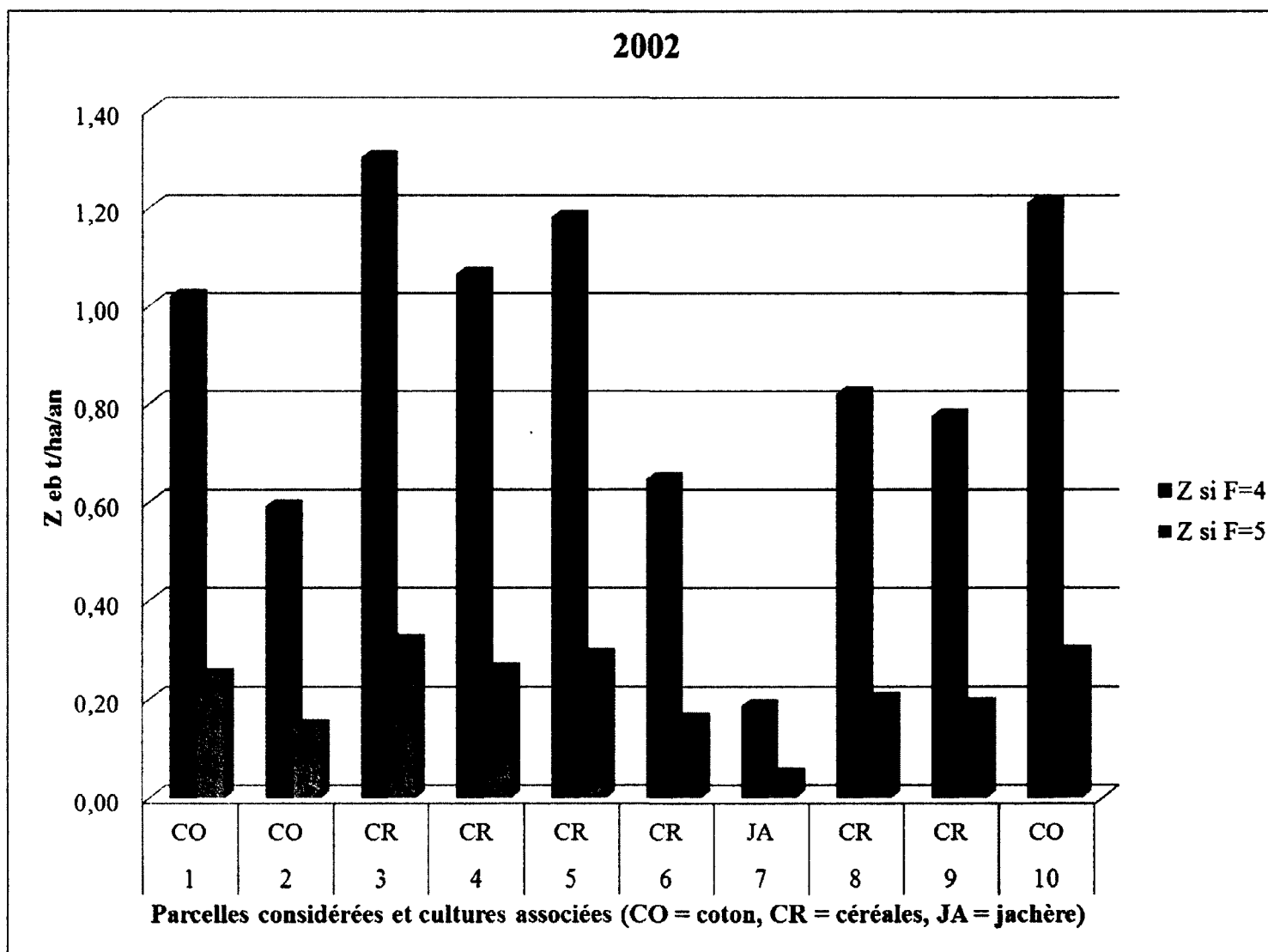


**Figure 10. Histogramme de comparaison des taux de pertes en sols (Z) incluant l'application de mesures de conservation (F = 5) aux estimations calculées précédemment (F = 4) pour l'année 2000.**





**Figure 11. Histogramme de comparaison des taux de pertes en sols (Z) incluant l'application de mesures de conservation (F = 5) aux estimations calculées précédemment (F = 4) pour l'année 2001.**



**Figure 12. Histogramme de comparaison des taux de pertes en sols (Z) incluant l'application de mesures de conservation (F = 5) aux estimations calculées précédemment (F = 4) pour l'année 2002**

#### 4.4. Discussion

L'application du modèle SLEMSA aux parcelles agricoles du terroir d'Umarbugu a permis d'estimer les quantités de pertes de sols et donc d'évaluer l'importance du phénomène dans la région. Par ailleurs, elle a amené à la mise en évidence de facteurs favorisant le phénomène d'érosion des sols : le climat, du fait de son intensité et de sa grande variabilité, la superficie des parcelles, plus elles sont vastes et plus les taux de pertes de sols sont élevés, ou encore le type de culture, les céréales protègent davantage le sol de l'érosivité des précipitations que le coton. Enfin, mais surtout, les simulations effectuées à l'aide du modèle SLEMSA ont souligné l'efficacité en terme de réduction des taux de pertes de sols de certaines pratiques de conservation dont on sait qu'elles commencent à être mise en place par certains propriétaires (comm. pers. S. Traoré, 2009).

D'autre part, de même que cela a été soulevé lors d'études antérieures (Bobe, 2004), on constate que le modèle est particulièrement sensible aux conditions topographiques du terrain ainsi qu'à l'érodabilité des sols. De ce fait, et considérant également l'échelle d'application du modèle, il aurait été préférable d'utiliser des données de microtopographie comme intrants au modèle. Malheureusement, celles-ci ne sont pas disponibles pour la région concernée et le MNT issu de l'image ASTER constitue la meilleure donnée accessible. Néanmoins, celui-ci n'ayant pu être corrigé, il est probable que les éventuelles erreurs qui le caractérisent affectent les estimations produites par le modèle SLEMSA. Il serait donc intéressant de corriger le MNT à l'aide de données collectées sur le terrain, tel qu'envisagé à la section 3.1.1 afin d'améliorer les estimations de pertes en sols produites.

L'influence du couvert végétal ne semble pas significative lorsque l'on observe les estimations obtenues à partir des données réelles mais elle est davantage mise en valeur par l'application du modèle sur une longue période. Cette dernière révèle également que la superficie des parcelles encourage davantage le processus d'érosion que l'inclinaison de la pente sur laquelle elles se situent.

Idéalement, pour déterminer le taux d'érosion acceptable d'un sol, on se fie à son taux de formation naturelle, souvent très difficile à déterminer avec précision. En moyenne, les études scientifiques concernant le phénomène d'érosion des sols en agriculture s'entendent pour admettre un taux de 11 t/ha/année comme étant acceptable (Morgan, 2005) pour un sol fertile

sous un climat tempéré. Cependant, pour des sols fins ou avec une grande érodabilité le taux de pertes de sols acceptable n'est que de 2t/ha/an. En conséquence les résultats obtenus démontrent l'intérêt même de la recherche car les taux de pertes de sols dépassent trop souvent largement les taux acceptables. La prise en compte de mesures de conservation dans le fonctionnement du modèle a permis de mettre en valeur l'efficacité de celles-ci pour lutter contre la dégradation des sols.

Pour s'assurer de la validité des estimations produites par un modèle d'érosion, il est normalement nécessaire de mettre en place des dispositifs sur le terrain pour mesurer en temps et conditions réels les pertes de sols. De telles expérimentations étaient malheureusement impossibles à réaliser pour la présente étude en raison de leurs coûts et de leur durée d'application requise pour les rendre comparables aux estimations produites par le modèle SLEMSA. Il a fallu prêter une attention particulière à la similarité de l'ensemble des variables considérées dans le modèle entre la présente étude et les précédentes applications de SLEMSA afin d'évaluer le bon fonctionnement de chaque sous-modèle. Cette méthode a permis de démontrer que les calculs ont été effectués correctement mais ne donne pas une idée précise du rapport entre les estimations et la réalité. Cependant, on espère qu'une telle validation permettra d'aboutir à des résultats finaux dont la précision serait comparable à celle démontré par les applications antérieures du modèle SLEMSA. Par exemple, la première application du modèle SLEMSA (Elwell, 1978) avait prouvé son efficacité par une très forte corrélation ( $r = 0,95$ ) entre les estimations produites et les mesures prises sur le terrain.

La comparaison des estimations produites par l'application du modèle SLEMSA à celles résultant de l'application du modèle USLE a permis d'en renforcer la validation. En effet, même si les deux modèles présentent de grandes différences, si l'on considère des zones d'études similaires les estimations produites sont semblables.

## 5. Conclusion

L'application du modèle SLEMSA aux parcelles agricoles du terroir d'Umarbugu s'est révélée concluante et constitue donc une base pour l'évaluation de l'ampleur du phénomène de dégradation des sols dans la région. Les estimations obtenues ont permis de constater dans un premier temps la grande sensibilité du modèle à la variable climatique, ce qui corrobore les résultats d'études antérieures (Bobe, 2004). Mais cette recherche a également conduit, grâce au nombre et aux caractéristiques variables des parcelles considérées, à l'identification de facteurs pouvant aggraver le phénomène d'érosion tels que la culture du coton ou la grande superficie de certains champs. Dans un deuxième temps, il a été possible de démontrer la grande efficacité des mesures de conservation que certains propriétaires de parcelles commencent à mettre en place puisqu'on a constaté qu'elles permettaient une diminution de plus de 60 % des taux de pertes en sols.

Les modèles d'érosion hydrique constituent de très bons outils pour évaluer le risque de dégradation des sols, y compris les modèles les plus anciens tels que SLEMSA. Cependant, on a pu remarquer que malheureusement, dans cette région du monde, pourtant l'une des plus touchées par le phénomène d'appauvrissement des sols, les études concernant ce phénomène sont moins fréquentes qu'ailleurs et disposent de moins de moyens. Si le contexte évoluait, il serait très intéressant d'organiser une campagne de terrain permettant un suivi constant des taux de pertes en sols ou, mieux encore, d'appliquer un modèle plus récent, tel que le modèle EPIC (Williams *et al.*, 1983) qui permettrait de traduire les pertes de sols au coût qu'elles induisent du fait de la diminution de la productivité de la parcelle.

L'importance du secteur agricole au Sud du Mali, notamment du point de vue économique, associée à la croissance démographique présentent le risque d'accroître fortement le phénomène d'appauvrissement des sols. Sikasso en particulier est l'une des régions agricoles les plus importantes du Mali, mais la diminution des précipitations et la dégradation des sols au cours des dernières décennies ont entraîné une importante réduction de la période de culture (Gouvernement du Mali, 2000). Il est donc indispensable de prendre des mesures pour limiter les conséquences à long terme de la dégradation des terres.

## **6. Références**

Bobe, B. B. (2004) Evaluation of soil erosion in the Harerge region of Ethiopia using soil loss models, rainfall simulation and field trials, Thèse de doctorat, Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of Pretoria, Pretoria, 220 p.

Breetzke, G. D. (2004) A critique of soil erosion modeling at a catchment scale using GIS. Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (UNIGIS), Faculteit der Aard-en Levenswetenschappen, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands, 178 p.

Elwell, H. A. (1978) Modelling soil losses in Southern Africa. *Journal of Agricultural Engineering*, n° 23, p. 117-127.

Foucault, A., Raoult, J. F. (2000) Dictionnaire de géologie. Dunod, 5<sup>e</sup> édition, 380 p.

Flanagan, D. C., Ascoug II, J. C., Nicks, A. D., Nearing, M. A., Laflen, J. M. (1995) Overview of the WEPP erosion prediction model. USDA-Water Erosion Prediction Project, Hillslope Profile and Watershed Model Documentation, NSERL Report n°10, chapter 1, p. 1-12.

Gaillard, C. (2001) Amélioration d'un modèle distribué d'érosion hydrique par la prise en compte spatiale de l'influence anthropique en milieu agricole. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D.) en télédétection, Département de Géographie et Télédétection, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 195 p.

Goïta K., (2010) Communication personnelle. Département de Géomatique Appliquée, Université de Sherbrooke.

Gouvernement du Mali, Ministère de l'équipement, de l'aménagement du territoire, de l'environnement et de l'urbanisme et Ministère de l'éducation (2000) Communication initiale du Mali, Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique, 106 p.

Hirano, A., Welch, R., Lang, H., (2003) Mapping from Aster Stereo Image Data: DEM Validation and Accuracy Assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* n° 57, p. 356-370.

Hountondji Y.-C., Ozer P. et Nicolas J. (2004) Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger. *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, n° 291, 18 p.

Igwe C. A., Akamigbo F.O.R., Mbagwu J.S.C. (1999) Application of SLEMSA and USLE erosion models for potential erosion hazard mapping in south-eastern Nigeria. *International Agrophysics*, Lublin, Pologne, vol. 13, n° 1, p. 41-48.

Knisel, W. G. (1980) CREAMS: A field-scale model for chemicals and erosion from agricultural management systems. U.S. Department of Agriculture, Science and Education Administration, Conservation Research Report n° 26, 643 p.

Morgan, R. P. C. (2005) Soil Erosion and Conservation. Blackwell Publishing, Third Edition, Oxford, 304 p.

Morgan, R. P. C., Rickson, R. J., McIntyre, K., Brewer, T. R., Altshul, H. J. (1997) Soil erosion survey of the central part of the Swaziland Middleveld. *Soil Technology*, p. 263-289.

Mulders M.A., Sorateyan S. (1996) GIS and remote sensing for mapping soils and erosion hazard in the Kaya region, Burkina Faso. In : Escadafal Richard (ed.), Mulders M.A. (ed.), Thiombiano L. (ed.). (1995) Monitoring soils in the environment with remote sensing and GIS. ISSS International Symposium (Working Groups RS and DM), February 06-10, Ouagadougou. Paris : ORSTOM, p. 63-77.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. (2005) Soil and Water Assessment Tool, Theoretical documentation, Version 2005. Texas A&M University, 494 p.

Organisation Météorologique Mondiale (2005) Le climat et la dégradation des sols. OMM, bulletin n° 989, 34 p.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., Yoder, D. C. (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). US Department of Agriculture, Agriculture Handbook, n° 703, 404 p.

Senahoun, J., Heidhues, F. et Deybe, D. (2001) Structural adjustment program and soil erosion a bio-economic modeling approach for Northern Benin. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Soil Conservation Organization Meeting, May 24-29, Purdue University, p. 131-138.

Stocking M., Chakela Q., Elwell, H. A. (1988) An improved methodology for erosion hazard mapping. Part I: The technique, Blackwell Publishing on behalf of Swedish Society for anthropology and Geography. Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography, Vol. 70, n° 3, p. 169 – 180.

Stöckle, C. O., Donatelli M. et Nelson. R. (2003) CropSyst, a cropping systems simulation model. European Journal of Agronomy n° 18, p. 289-307.

Svorin, J. (2003) A test of three soil erosion models incorporated into a geographical information system. Institute of Geography, University of Copenhagen, Oster Voldgade 10, 1350 Copenhagen. Hydrological processes, vol. 17, p. 967-977.

Symeonakis, E. et Drake, N. (2004) Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, n° 3, p. 573-592.

Traore, S. (2009) Communication personnelle, International Crop Research Institute for Semi-Arides Tropics (ICRISAT)

United States Department of Agriculture (2009) Natural Resources Conservation Service, Technical References. *in* United States Department of Agriculture, <http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome>.

Williams, J.R., Dyke, P.T. et Jones, C.A. (1983) EPIC: a model for assessing the effects of erosion on soil productivity. In Analysis of Ecological Systems: State-of-the-Art in Ecological Modeling. Eds. W.K. Laurenroth *et al.* Elsevier, Amsterdam, p 553-572.



Williams, J. R. et Hann, R. W. Jr. (1978) Optimal operation of large Agricultural watersheds with water quality constraints. Texas A&M University, Texas Water Resources Institute, Technical report n° 96, 162 p.

Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978) Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. Agriculture Handbook 537. Science and Education Administration, U.S. Department of Agriculture, 58 p.

Wu, T. H., Hall, J. A. et Bonta, J. V. (1993) Evaluation of runoff and erosion model. ASCE, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 119, n° 4, p. 364-382.

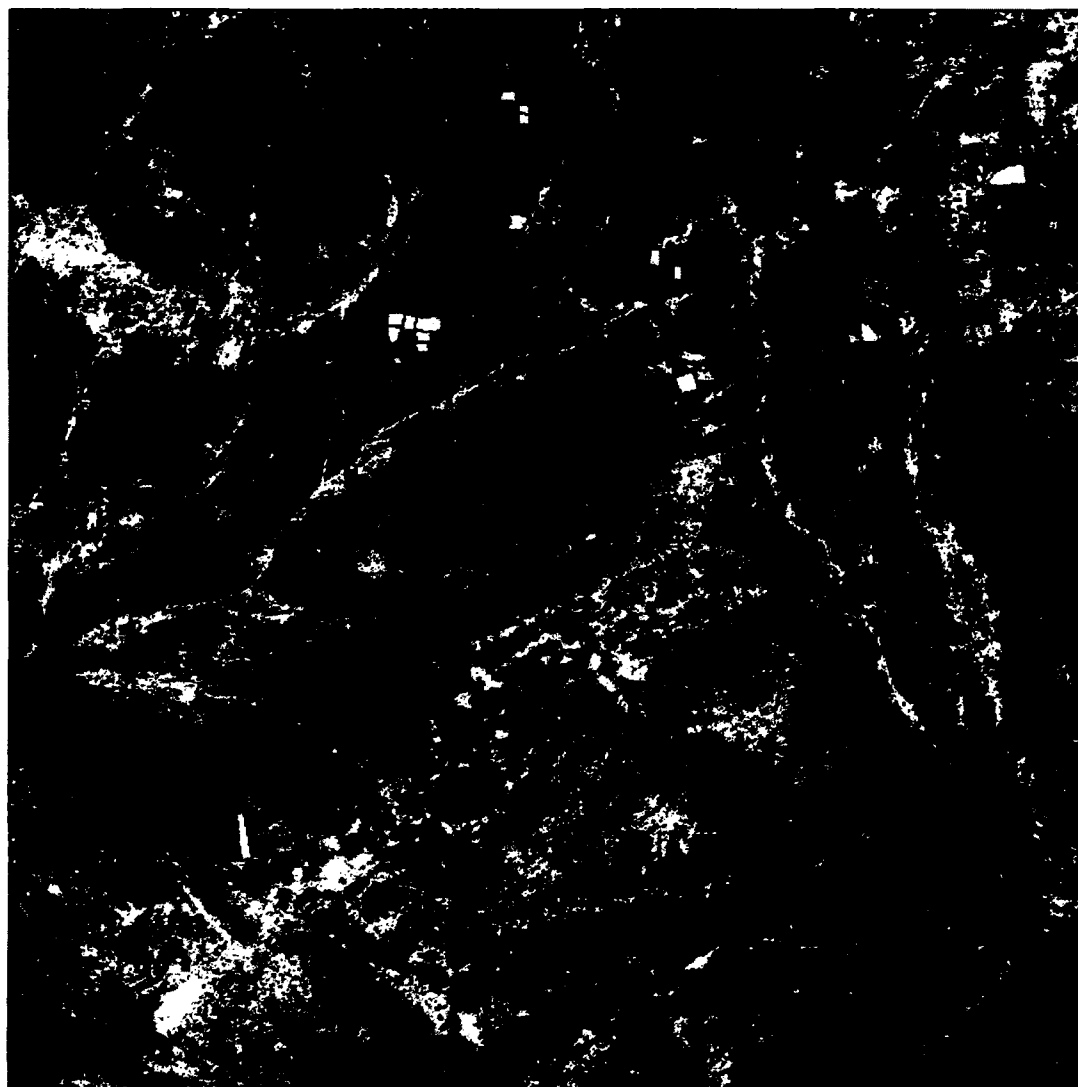
Xiao, J., Shen, Y., Tateishi, R. et Bayaer, W. (2006) Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. International Journal of Remote Sensing, vol. 27, n° 12, p. 2411-2422.

Zingg, A. W. (1940) Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. Agricultural Engineering, n° 21, p. 59-64.

## 7. Annexes

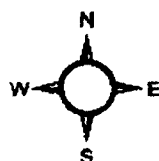
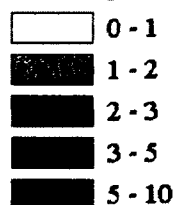
### Annexe 1. Cartes des estimations de pertes de sols obtenues pour les années 2000, 2001, 2004, 2005, 2006

Estimations produites par le modèle SLEMSA des taux de pertes des sols (en t/ha/année)  
pour l'année 2000



#### Légende

Taux de pertes en sols en t/ha/année

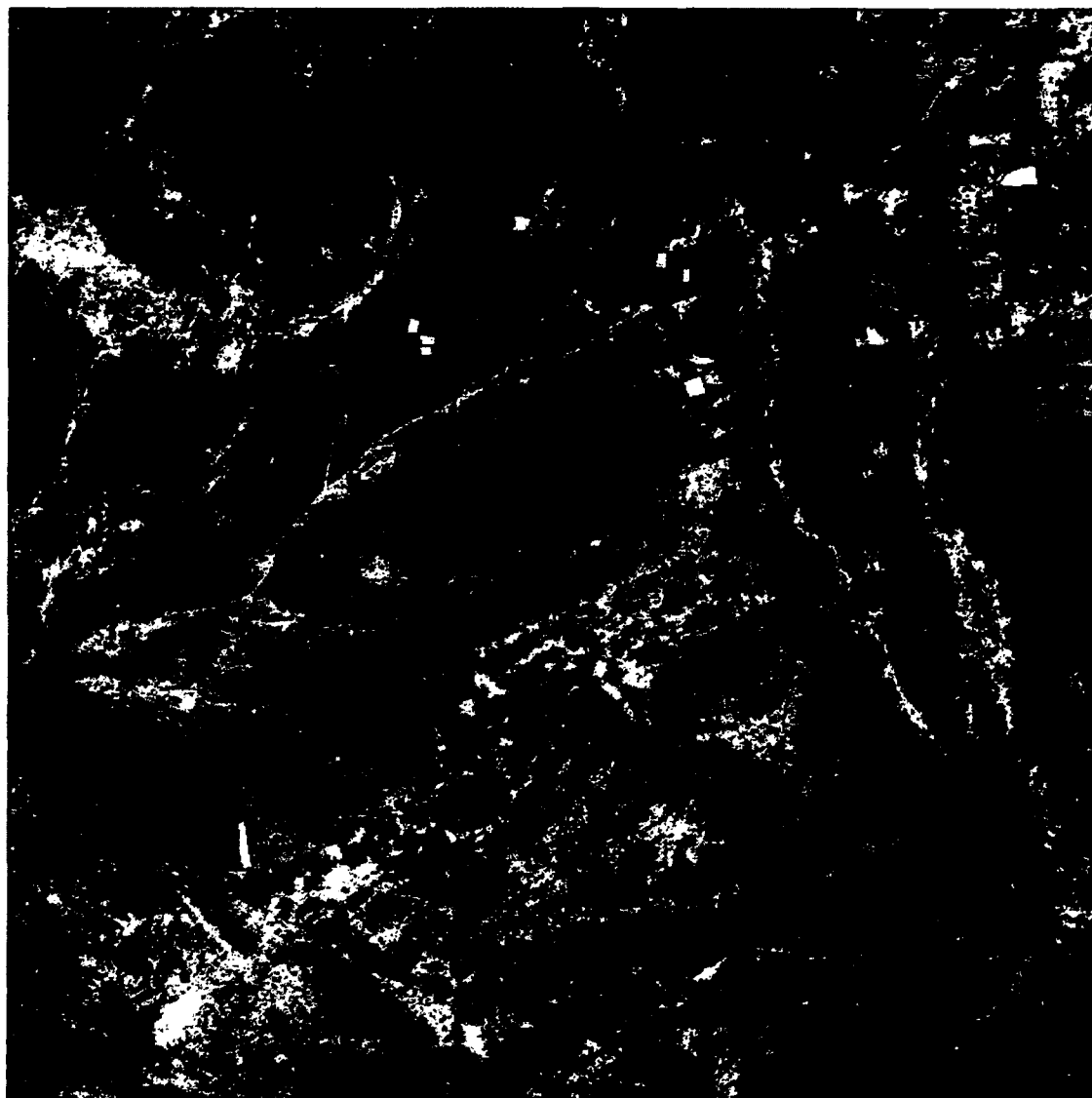


1 000 500 0 1 000 Mètres



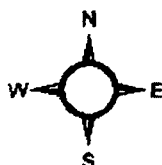
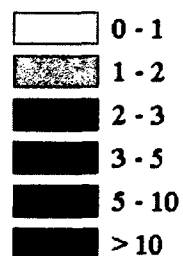
Carte réalisée par Cyrielle Loyer  
Sources: image QuickBird du 03 août 2003  
MNA Aster et données prises sur le terrain  
fournies par l'ICRISAT

Estimations produites par le modèle SLEMSA des taux de pertes des sols (en t/ha/année)  
pour l'année 2001



Légende

Taux de pertes en sols en t/ha/année

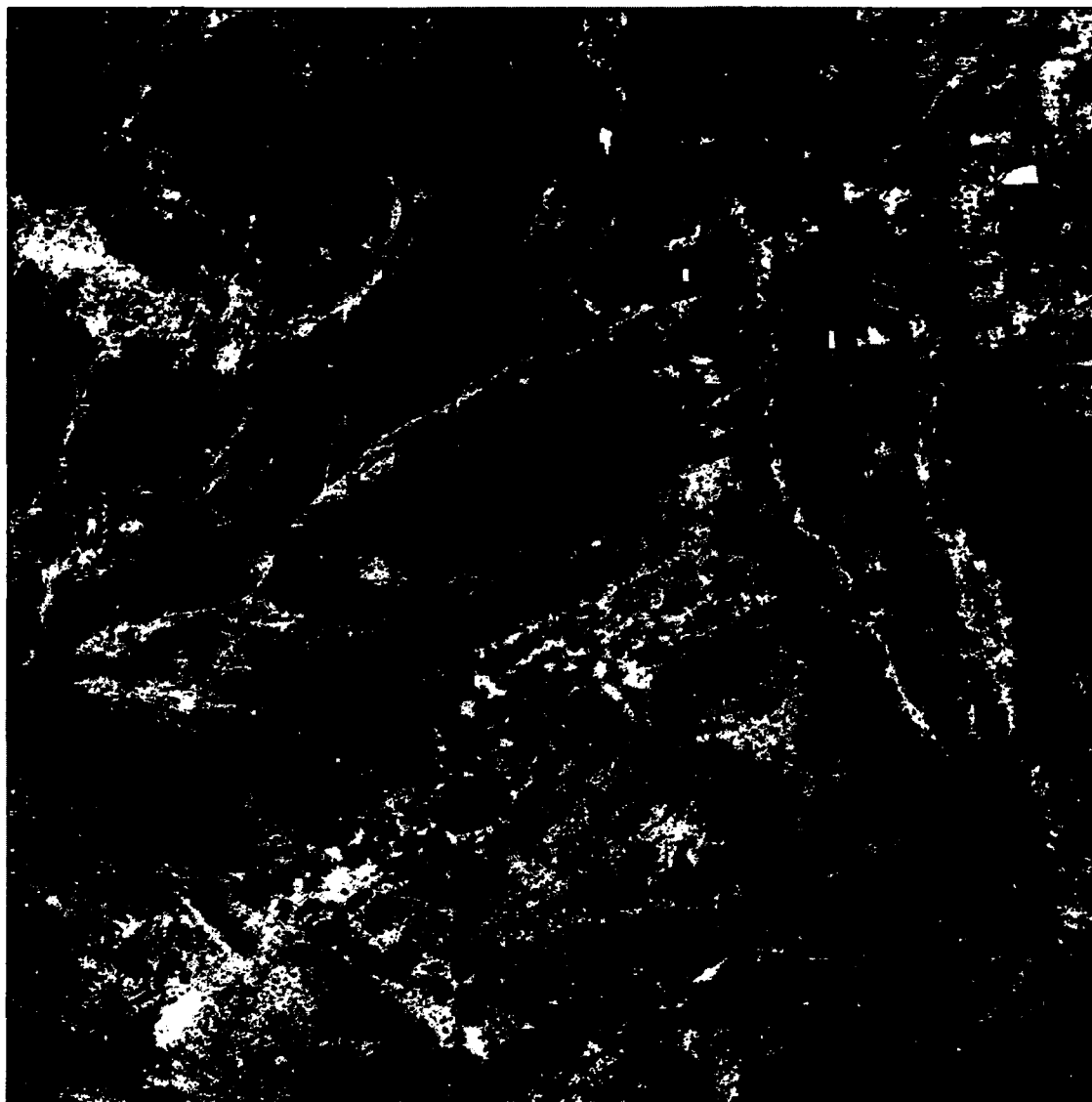


990 495 0 990 Mètres



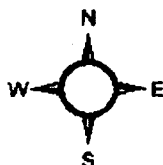
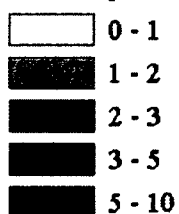
Carte réalisée par Cynelle Loyer  
Sources: image QuickBird du 03 août 2003  
MNA Aster et données prises sur le terrain  
fournies par l'ICRISAT

Estimations produites par le modèle SLEMSA des taux de pertes des sols (en t/ha/année)  
pour l'année 2004



**Légende**

Taux de pertes en sols en t/ha/année



1 000 500 0 1 000 Mètres

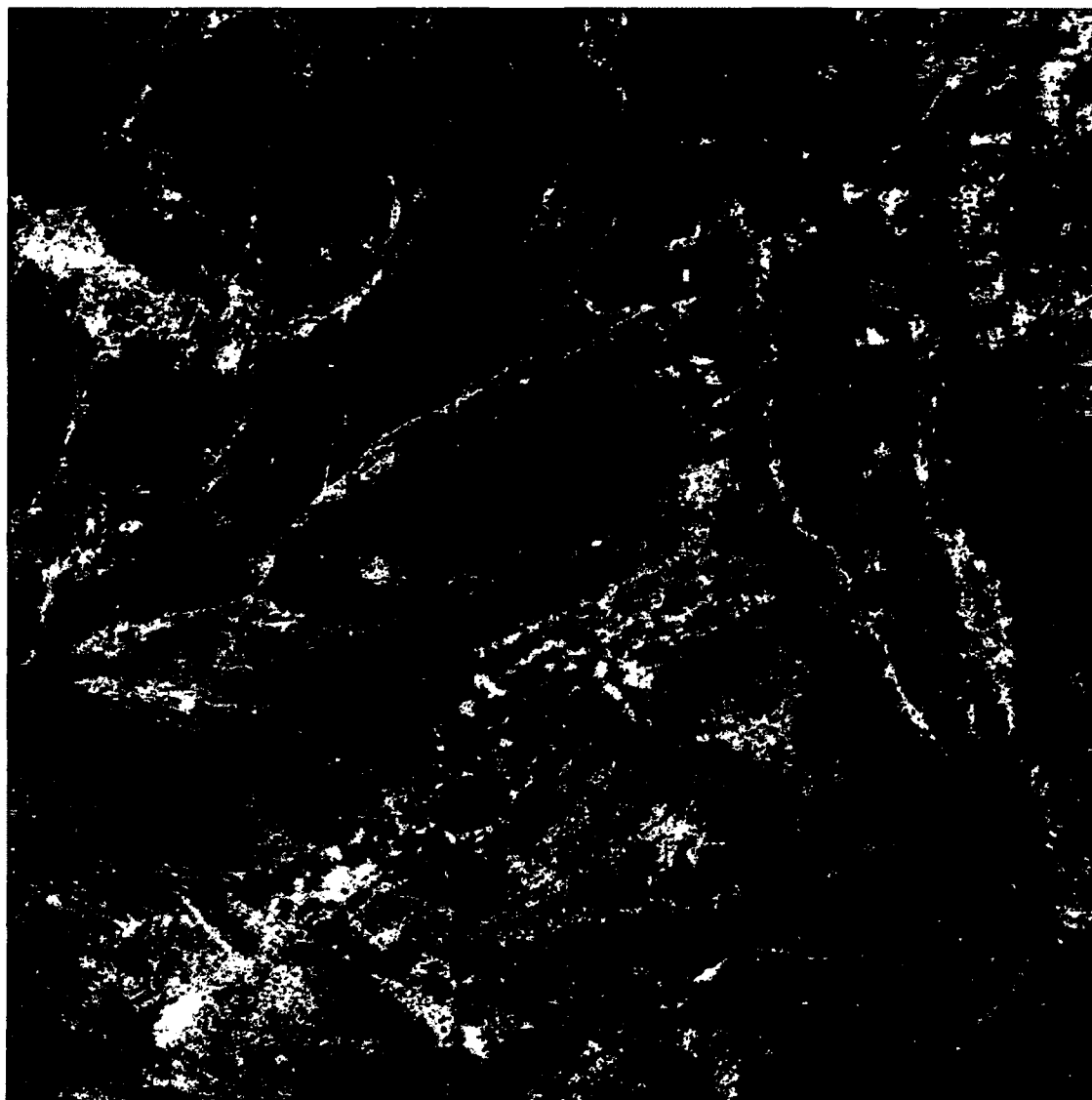


Carte réalisée par Cynielle Loyer

Sources: image QuickBird du 03 août 2003

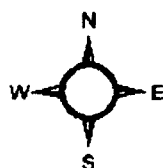
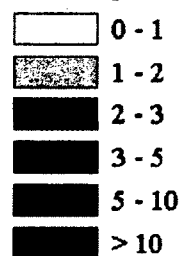
MNA Aster et données prises sur le terrain  
fournies par l'ICRISAT

Estimations produites par le modèle SLEMSA des taux de pertes des sols (en t/ha/année)  
pour l'année 2005



**Légende**

Taux de pertes de sols en t/ha/année

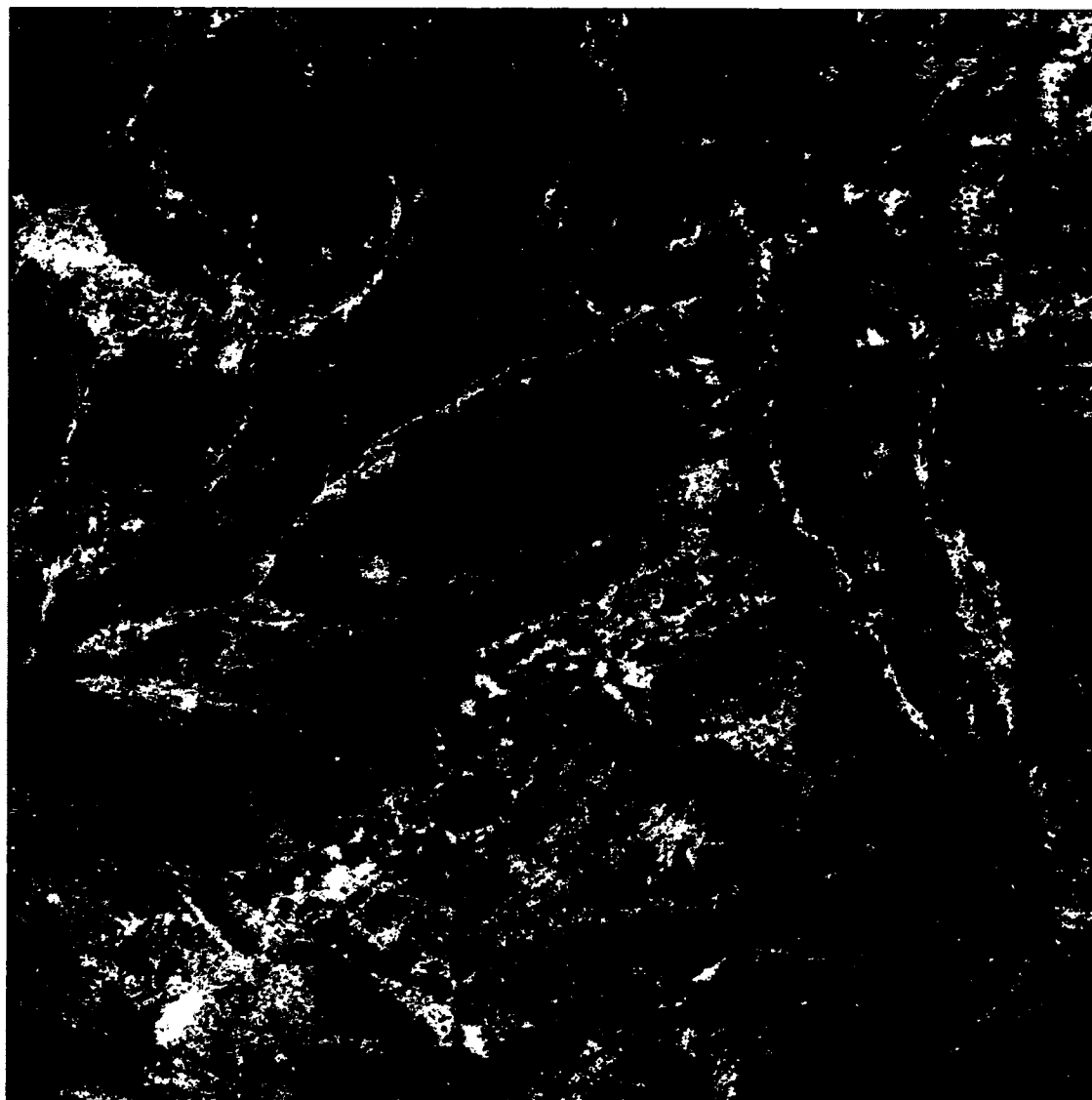


1 000 500 0 1 000 Mètres



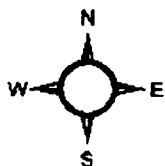
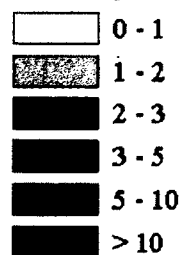
Carte réalisée par Cynelle Loyer  
Sources: image QuickBird du 03 août 2003  
MNA Aster et données prises sur le terrain  
fournies par l'ICRISAT

Estimations produites par le modèle SLEMSA des taux de pertes des sols (en t/ha/année)  
pour l'année 2006



Légende

Taux de pertes en sols en t/ha/année

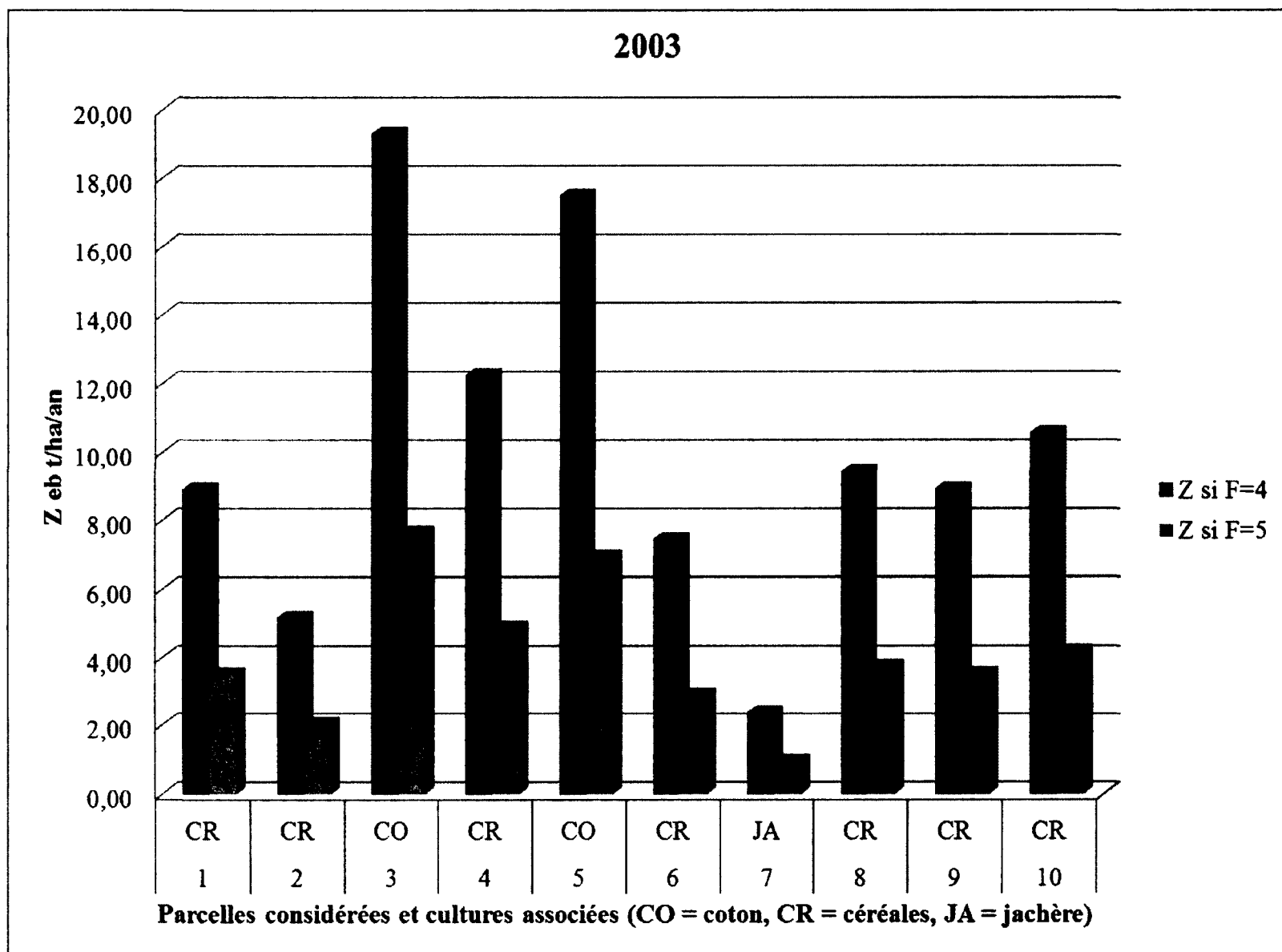


990 495 0 990 Mètres

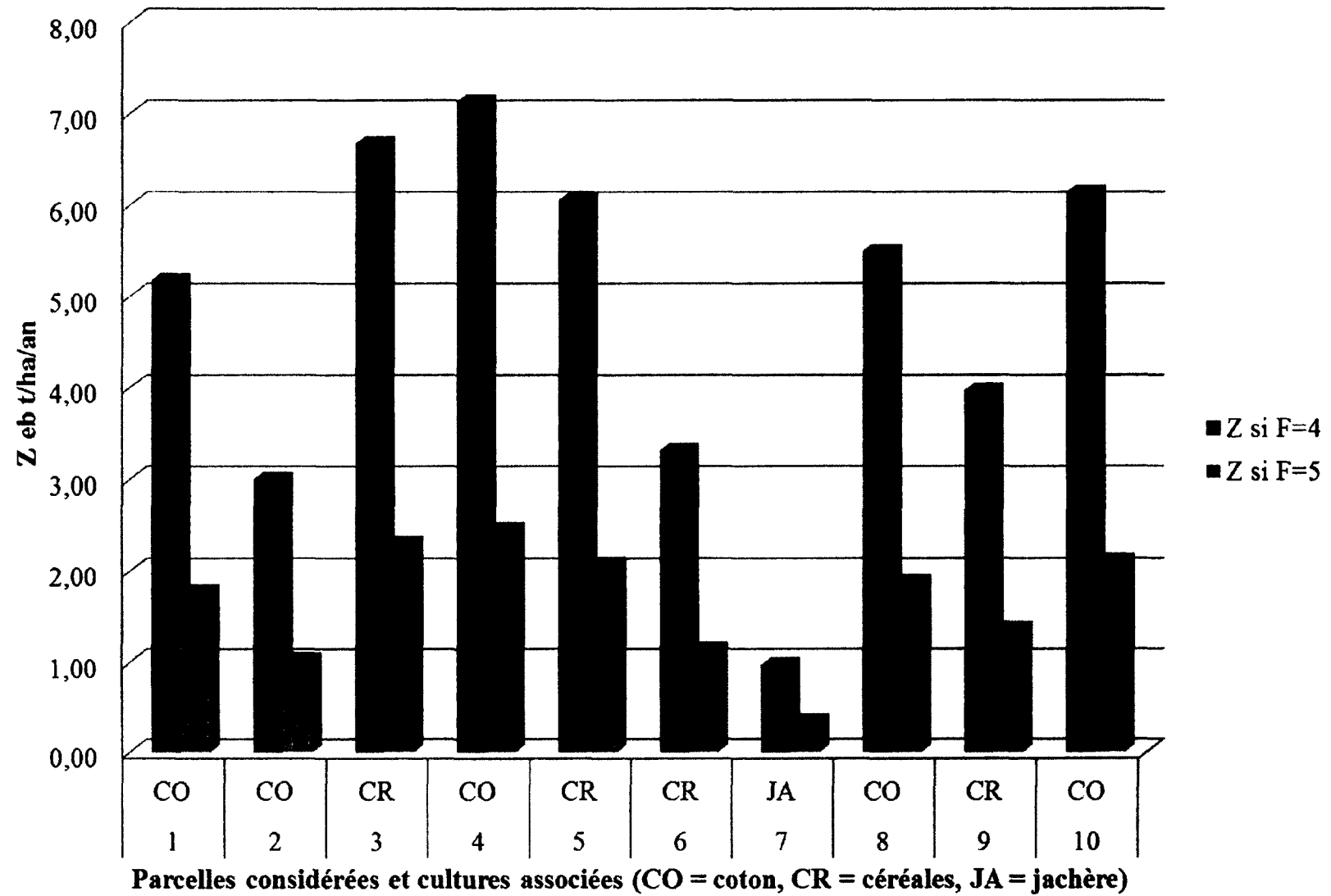


Carte réalisée par Cynelle Loyer  
Sources: image QuickBird du 03 août 2003  
MNA Aster et données prises sur le terrain  
fournies par l'ICRISAT

**Annexe 2. Graphiques de comparaison des estimations de pertes de sols calculées avec et sans considérer les mesures de conservation**

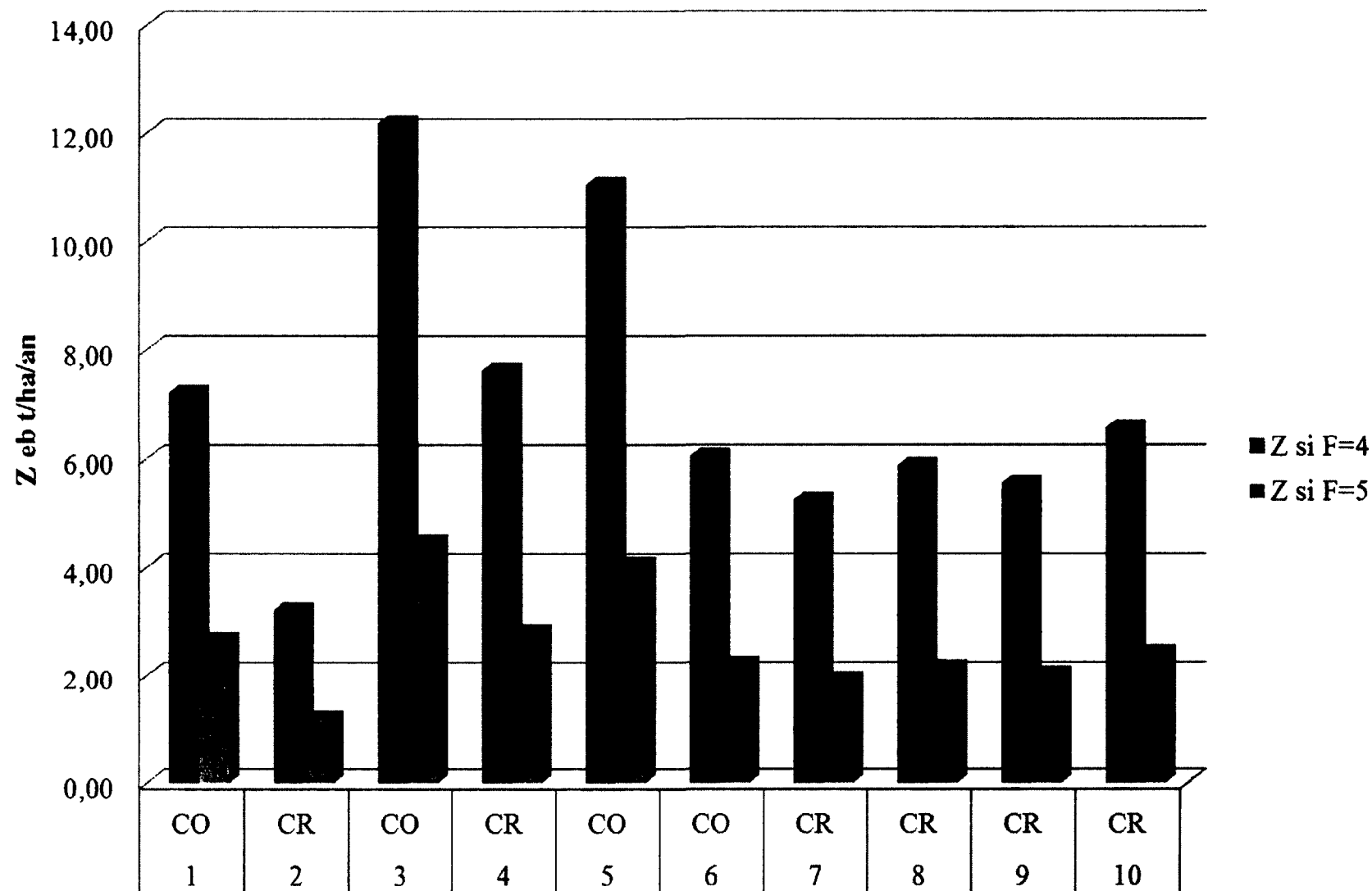


2004



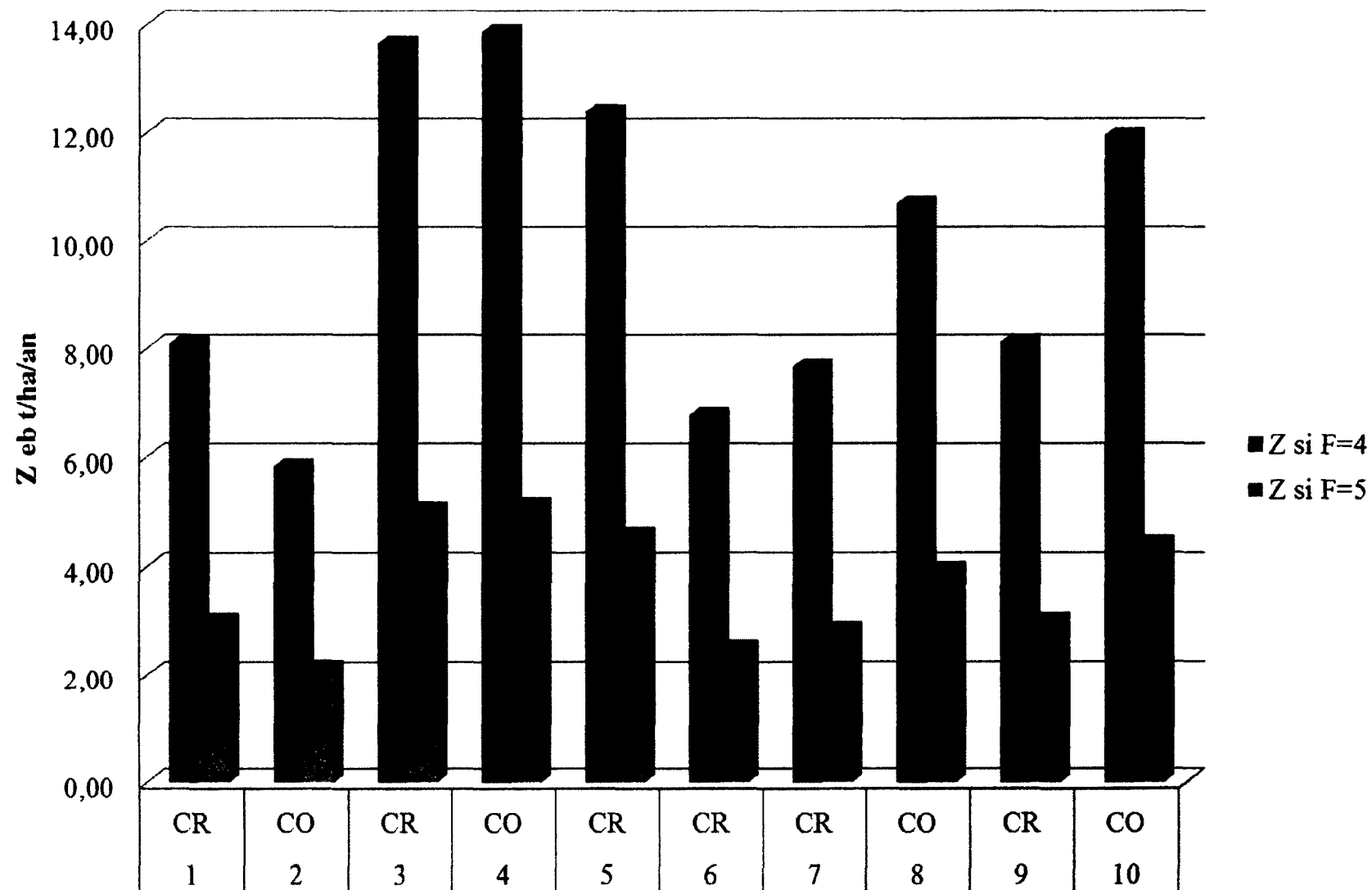


2005



Parcelles considérées et cultures associées (CO = coton, CR = céréales, JA = jachère)

2006



Parcelles considérées et cultures associées (CO = coton, CR = céréales, JA = jachère)